

Sampsa Vaurio

Litiumioniakun oikosulkusuojaus hybridityökoneessa

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 08.08.2013

Työn valvoja:

Prof. Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja:

DI Teemu Ronkainen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

AALTO YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä: Sampsa Vaurio		
Työn nimi: Litiumioniakun oikosulkusuojaus hybridityökoneessa		
Päivämäärä: 08.08.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+64
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Tehoelektroniikka		Koodi: S-81
Valvoja: Prof. Jorma Kyrrä		
Ohjaaja: DI Teemu Ronkainen		
<p>Tämä diplomityö käsittelee raskaassa hybridityökoneessa käytettävän litiumioniakun ja tasasähkökatkojan muodostaman kokonaisuuden oikosulkusuojausta. Työssä selvitettiin kirjallisuustutkimuksella ja haastatteluilla litiumioniakkujen oikosulkusuojaukseen liittyviä ongelmia ja niiden mahdollisia ratkaisuja. Tutkimuksen kohteeksi otettiin yleisesti oikosulkusuojaukseen käytettävät laitteet: sulake ja DC-kontaktori.</p> <p>Selvitystyön tuloksien perusteella todettiin, että suojalaitteiden mitoittaminen akkujärjestelmään on hankalaa ja osa suojalaitteista soveltuu paremmin henkilöautokokoluokan suojaukseen. Mitoittamisongelman ratkaisuksi tutkittiin mahdollisuutta hyödyntää akkujen simulointimalleja oikosulkusuojien mitoituksessa. Tutkimuksessa osoittautui, ettei kyseiseen käyttötarkoitukseen löytynyt sopivaa mallia, eikä olemassa olevien akkumallien käyttöä ole testattu oikosulkutilanteiden simuloinnissa.</p> <p>Työssä tutkittiin lisäksi mahdollisuutta käynnistää sulakkeen valokaariaika siihen suunnitellulla sulakkeenpolttopiirillä. Suoritettujen mittauksien perusteella ratkaisu ei toiminut toivotulla tavalla. Siitä huolimatta, että työssä ei kyetty löytämään ratkaisua tutkimusongelmaan, nykyisten ratkaisujen ongelmakohtia saatiin nostettua esiin ja ehdotettua jatkotutkimuskohteita.</p>		
Avainsanat: Oikosulku, litiumioniakku, oikosulkusuojaus, sulake, kontaktori, hybridiajoneuvo, työkon, energiavarasto, sähköajoneuvo		

AALTO UNIVERSITY
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author: Sampsa Vaurio

Title: Short circuit protection of the Lithium-ion battery in heavy-duty hybrid vehicle

Date: 08.08.2013

Language: Finnish

Number of pages: 9+64

Department of Electrical Engineering

Professorship: Power Electronics

Code: S-81

Supervisor: Prof. Jorma Kyyrä

Instructor: M.Sc. Teemu Ronkainen

The Master's thesis addressed the problem of short circuit protection of a lithium-ion battery and a DC-DC converter in a heavy-duty hybrid electric vehicle. In this thesis literary research and interviews were used to investigate problems and possible solutions in above-mentioned setting. Commonly used short circuit protection devices i.e. a fuse and a DC contactor were selected for a more detailed investigation.

As a result, it was concluded that dimensioning of the protection devices to a battery system is difficult and some of the protection devices are better suitable for the protection of a hybrid electric car. To solve the dimensioning problem, possibility to use battery simulation models on dimensioning of the protection devices was investigated. As a result, it is concluded that a suitable battery model for this type of use is not available. Existing models have not been tested in simulation of the short circuit situations.

In this thesis, the possibility of starting the fuse arcing time with a specifically designed fuse burning circuit was investigated with measurements. Based on the measurements, it was found that the solutions did not behave as expected. Although, this thesis could not find a solution to the presented research problem, it was able to highlight the problems with the current short circuit protection solutions and give suggestions for further research.

Keywords: Short circuit, Lithium-ion battery, short circuit protection, fuse, contactor, hybrid vehicle, heavy electric vehicle, energy storage

Esipuhe

Haluan kiittää professori Jorma Kyyrää ja ohjaajani Teemu Ronkaista hyvästä ohjauksesta ja kommentoinnista työni aikana. Lisäksi kiitokset kuuluvat Jukka-Pekka Kittilälle, Lauri Peltoselle ja Teemu Salmialle. Kiitos lisäksi myös kaikille muille työssä auttaneille.

Helsinki, 07.07.2013

Sampsa Vaurio

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	IV
Sisällysluettelo	V
Symbolit ja lyhenteet	VII
1 Johdanto	1
2 Hybridiajoneuvokäytön sähköisten komponenttien esittely	3
2.1 Hybridiajoneuvon sähkökäytön rakenne	3
2.2 Tasasähkökatkoja	4
3 Ylivirtatilanteet	7
3.1 Ylikuormitus	7
3.2 Oikosulku.....	7
3.3 Esimerkkejä tasasähkökatkojan oikosulkutilanteista	8
4 Suojalaitteet	11
4.1 Sulakkeen rakenne	11
4.2 Sulakkeen toimintaperiaate.....	12
4.3 Sulake tasasähköpiirissä	16
4.3.1 Sulamiskäyrä.....	16
4.3.2 Tasasähköpiirin oikosulku ja sulakkeen toiminta	18
4.3.3 I^2t -arvo.....	21
4.3.4 Sulakkeen mitoitus tasasähköpiiriin	22
4.4 Sulakkeen simulointimalli	27
4.5 DC-kontaktorin rakenne ja toimintaperiaate	30
5 Litiumioniakku	34
5.1 Akkujen peruskäsitteitä	34
5.1.1 Litiumioniakun rakenne ja toimintaperiaate	34
5.1.2 Litiumioniakun käyttö	37
5.2 Litiumioniakun simulointimallit	38
5.3 Litiumioniakun suojausvaatimukset.....	41
5.4 Litiumioniakun tyypilliset suojaustavat ja niiden mitoitus	44
6 Oikosulkusuojauksen vaihtoehtoinen menetelmä	46
6.1 Ideaalimuuntaja.....	46

6.2	Sulakkeenpolttopiiri	48
6.3	Mittausjärjestely	49
6.4	Mittautulokset ja niiden tarkastelu	52
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	57
	Viitteet	58
	Liite A: Sulakkeen nimellisvirran mitoitus syklisessä käytössä	61

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	valokaaren sulattaman sulake-elementin pinta-ala
C_v	välipiirin kapasitanssi
$C_{\tau n}$	dynaaminen kapasitanssi
C_{cap}	ekvivalentti kapasitanssi
D	diodi
e	sähkökentän voimakkuus
I	virran tehollisarvo
I_1	ensiökäämin virta
I_2	toisiökäämin virta
I_b	sulakkeen kestävä virran tehollisarvo
I_E	energiavaraston virran tehollisarvo
I_n	sulakevalmistajan sulakkeelle ilmoittama nimellisvirta
i	virran hetkellisarvo
i_k	diskreetti virran hetkellisarvo
i_p	prospektiivinen oikosulkuvirta
i_{RL}	RL-piirin virran hetkellisarvo
K_e	liitostavan korjauskerroin
K_f	virran taajuuden korjauskerroin
K_t	ympäristölämpötilan korjauskerroin
K_v	jäähdytyksen korjauskerroin
L	induktanssi
L_s	sarjainduktanssi
l	valokaaren pituuden hetkellisarvo
l_0	valokaaren pituus alussa
N_1	ensiökäämin kierrosluku
N_2	toisiökäämin kierrosluku
n_r	sulake-elementissä sarjassa olevien kaulojen lukumäärä
P	vakioteho

Q_1	akun varaustila täytenä
Q_2	akusta purkautunut varaus
R	vastus
R_s	sarjavastus
R_{sd}	itsepurkautumisvastus
R_{tn}	dynaaminenvastus
T_{m0}	valokaariajan alkamishetki
T	jaksonaika
t	aika
t_G	kokonaistoiminta-aika
t_S	sulamisaika
t_V	valokaariaika
U	jännitteen tehollisarvo
U_1	ensiökäämin jännite
U_2	toisiökäämin jännite
U_{ac}	välipiirin jännitteen tehollisarvo
U_E	energiavaraston jännitteen tehollisarvo
u_a	sulakkeen jännitteen hetkellisarvo
u_b	akun jännite
u_{ac}	vaihtojännitteen hetkellisarvo
u_{AK}	valokaaren anodi-katodi jännite
u_{OCV}	avoimen piirin jännite
W	energia
Z_{ac}	impedanssi

Kreikkalaiset aakkoset

ΔU_d	välipiirin jännitteen tehollisarvon muutos
ΔT	sulake-elementin lämpötilan muutos
τ	aikavakio
ϕ	magneettivuo

Lyhenteet

AC	vaihtovirta
BATSO	Battery Safety Organisation
DC	tasavirta
DOD	Depth Of Discharge
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LFP	Litium-rautafosfaatti
LTO	Litium-titanaatti
OCV	Open Circuit Voltage
PWM	Pulse-Width Modulation
SAE	Society of Automotive Engineers
SOA	Safe Operating Area
SOC	State of Charge
UL	Underwriters Laboratories
a	associated
g	general

1 Johdanto

Energian säästäminen ja kulutuksen vähentäminen on ollut jo pitkään teollisuuden kiinnostuksen kohteena. Tähän on pyritty tehostamalla ja ohjaamalla taloudellisemmin teollisuuden erilaisia prosesseja. Erityisesti sähkömoottoreiden ohjaaminen taajuusmuuttajakäytöillä aikaansaa suuria säästöjä. Taajuusmuuttajan käyttö mahdollistaa sähkömoottorin nopeuden ohjaamisen hyvällä hyötysuhteella ja jarrutusenergian talteenoton.

Polttoaineen hinnan kasvaessa, päästörajoitusten kiristytessä ja ihmisten ympäristötietoisuuden lisääntyessä myös ajoneuvokäytöissä energiaa säästävät ratkaisut ovat nousseet ajankohtaisiksi. Viime vuosien polttomoottoritekniikan kehitys on vähentänyt polttoaineen kulutusta ja päästöjä, mutta fysikaalisten rajoitusten vuoksi polttomoottorin hyötysuhde häviää selvästi vertailussa sähkömoottorille.

Sähkömoottori ajoneuvon voimanlähteenä ei ole uusi keksintö. Sitä on käytetty ajoneuvoissa ennen kuin polttomoottoritekniikka oli riittävän kehittyneenä hyödynnettäväksi ajoneuvoissa. Kuitenkin vasta viime vuosien edistys sähkömoottoreiden ohjauksessa ja erityisesti energiavarastojen kehitys on mahdollistanut sähkömoottorien taloudellisesti järkevän käytön ajoneuvoissa.

Sähkö- tai hybridiajoneuvossa sähköenergian varastointiin voidaan käyttää akkua tai superkondensaattoria. Akku soveltuu suurien energiamäärien varastointiin ja sitä voidaan käyttää ajoneuvon ainoana energiavarastona. Superkondensaattori puolestaan soveltuu lyhytaikaiseksi energiavarastoksi. Siitä voidaan ottaa esimerkiksi kiihdytykseen tarvittava suuri energiamäärä nopeasti tai ottaa talteen jarrutuksessa syntyvä energia.

Erityisesti litiumiin perustuvat akkuteknologiat ovat nousseet lupaavimmiksi energialähteiksi haluttaessa suurta energianvarastointikapasiteettia ja tehotehkeyttä. Edistysaskeleet litiumioniakkujen teknologiassa ja valmistusmenetelmien kehitys ovat lisänneet niiden käytettävyyttä sekä laskeneet hankintakustannuksia. Ottaen huomioon ajoneuvon rajoitetun tilan, haastavat ympäristöolosuhteet, kolaririskin ja akkuihin varastoituneen suuren energiamäärän, turvallisuusnäkökohdat ovat erittäin tärkeässä roolissa suunniteltaessa toimivaa ja turvallista akkupakettia. Turvallisuuteen panostamisesta huolimatta sähköajoneuvojen akkupaloja on jo tapahtunut.

Tämän työn tavoitteena on selvittää haastatteluilla ja kirjallisuustutkimuksella raskaassa hybridityökoneessa käytettävän akkupaketin ja tasasähkökatkojan muodostaman kokonaisuuden oikosulkusuojaukseen liittyviä ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja. Väärin mitoitettu oikosulkusuojaus lisää henkilövahinkojen riskiä ja aiheuttaa kuluja ajoneuvon käyttäjälle käyttökeskeytyksen muodossa.

Vaikka sähköautoja on ollut markkinoilla pidempään, energiavaraston ja sähkökäytön hyödyntäminen raskaan työkoneen, esimerkiksi suurien maansiirtokoneiden, energiatehokkuuden parantamisessa on vasta yleistymässä. Hybridityökoneissa käytettävät jännitteet ja virrat ovat suurempia kuin esimerkiksi hybridihenkilöautoissa.

Luvussa 2 käydään läpi hybridiajoneuvon sähkökäytön rakennetta sekä siihen liittyvän tasasähkökatkojan topologia ja toimintaperiaate. Samassa luvussa rajataan myös työn kohteeksi otetun sähkökäytön osakokonaisuus. Tämän jälkeen luvussa 3 määritellään erilaiset ylivirtatilanteet eli ylikuormitus- ja oikosulkutilanteet. Luvussa annetaan myös esimerkkejä puolisiltakatkojen mahdollisista oikosulkutilanteista. Lisäksi käydään läpi puolisiltakatkojen ja kuristinpaketin muodostaman kokonaisuuden oikosulkusuojausta vaikeuttavia tekijöitä.

Luvussa 4 esitellään oikosulkusuojaukseen käytettävät laitteet, eli sulake ja kontaktori. Luvussa tutustutaan sulakkeen rakenteeseen ja sen mitoittamiseen valmistajan ohjeiden mukaisesti vaihto- ja erityisesti tasasähköpiireihin. Luvussa esitellään myös hybridiajoneuvoissa tyypillisesti käytettävän kontaktorin toimintaperiaate ja tarkastellaan sen soveltuvuutta suurien virtojen ja jännitteiden katkaisuun. Luvussa 5 esitellään työssä tutkittavan energiavaraston eli litiumioniakun toimintaperiaate ja akkuihin liittyviä peruskäsitteitä. Luvussa tutkitaan myös akun piirisimulaattorimallia ja sen soveltuvuutta oikosulkusuojien mitoittamiseen. Tämän jälkeen esitellään akkujen suojaukseen liittyviä standardeja ja testejä sekä suojausvaatimuksia. Lopuksi tutustutaan yleisesti käytössä olevaan suojausratkaisuun.

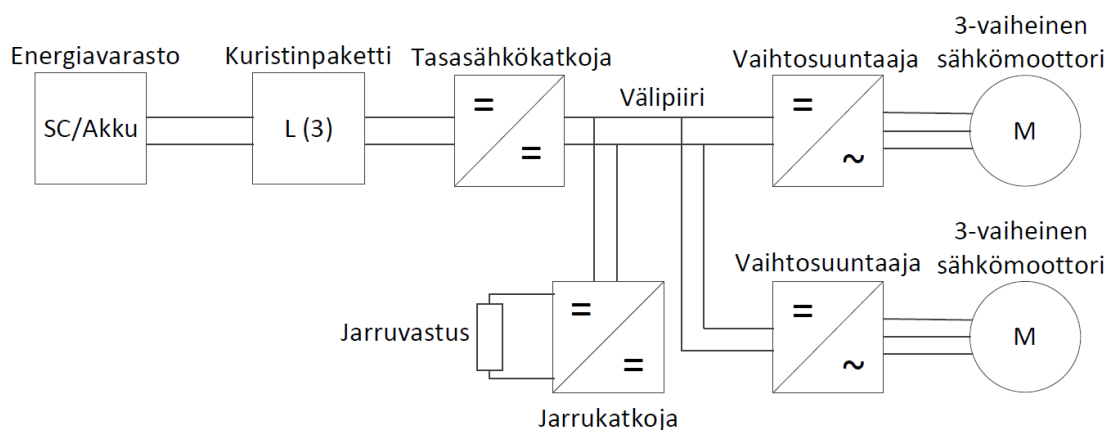
Luvussa 6 esitellään vaihtoehtoinen tapa käynnistää sulakkeen valokaariaika. Luvussa tutustutaan sulakkeenpolttopiirin teoreettiseen taustaan ja sen toimintaan osana hybridisähköjärjestelmää. Lisäksi sulakkeenpolttopiirin käyttökelpoisuutta tutkitaan mittauksilla.

2 Hybridiajoneuvokäytön sähköisten komponenttien esittely

Hybridiajoneuvon sähkökäyttö muodostuu useammasta yhteen liitetystä osakokonaisuudesta, joista tässä luvussa esitellään diplomityön kannalta oleelliset komponentit lukuun ottamatta energiavarastoa. Kohdassa 2.1 esitellään hybridiajoneuvon sähkökäytön rakennetta. Lisäksi rajataan tässä diplomityössä käsiteltävä osakokonaisuus. Tämän jälkeen kohdassa 2.2 käydään läpi työssä käytettävän tasasähkökatkojen topologia ja toimintaperiaate.

2.1 Hybridiajoneuvon sähkökäytön rakenne

Hybridiajoneuvon sähkökäytön tehtävänä on muokata energiaa hyvällä hyötysuhteella sähkökäytön eri jännite- ja virtatasojen välillä sopivaksi sekä toteuttaa prosessinohjaukselta saatavat ohjeet. Kuvassa 1 on esitetty hybridiajoneuvon sähkökäytön rakenne. Se koostuu energiavaraston (tässä työssä akku), kuristinpaketin ja kaksisuuntaisen tasasähkökatkojen muodostamasta energiavaraston lataus- ja purkuyksiköstä, joka on kytketty vaihtosuuntaajan jännitevälipiiriin. Vaihtosuuntaajan tehtävänä on ohjata moottoria siten, että se toteuttaa prosessinohjauksen pyytämät vääntömomentti- ja nopeusohjeet. Jännitevälipiiriin voidaan lisäksi kytkeä jarrukatkoja ja -vastus, joiden avulla välipiiriin varastoitunutta sähköenergiaa voidaan muuntaa lämmöksi.



Kuva 1. Hybridiajoneuvon sähkökäytön rakenne

Kuvan 1 mukaisen ratkaisun käyttäminen mahdollistaa sähkökäytön toimimisen kaikissa neljässä kvadrantissa, eli moottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin suunta voi vaihdella vapaasti. Tehoa voi siis siirtyä kiihdytystilanteessa energiavarastolta moottorille ja jarrutustilanteessa moottori voi toimia generaattorina

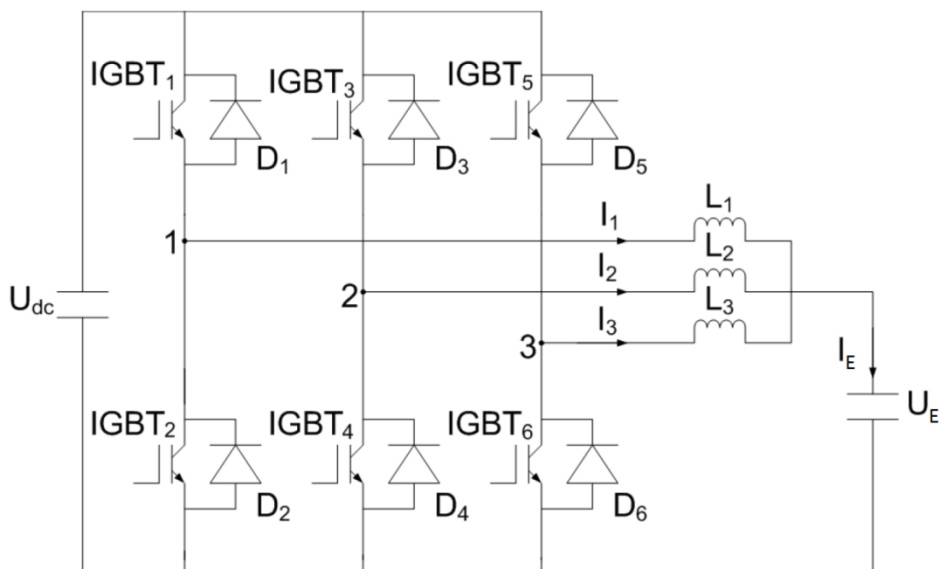
muuttaen liike-energian välipiiriin sähköenergiaksi. Välipiiriin varastoituneella ylimääräisellä energialla voidaan ladata energiavarastoa tai käyttää hyväksi muissa välipiiriin kytketyissä vaihtosuuntaajissa.

Tässä diplomityössä keskitytään tutkimaan energiavaraston, kuristinpaketin ja tasasähkökatkojan muodostaman kokonaisuuden ylivirta- ja oikosulkusuojausta. Kyseinen järjestelmä koostuu tyypillisesti useamman osatoimittajan esimerkiksi akku- ja tehoelektroniikkavalmistajan tarjoamista moduuleista, jotka hybridiajoneuvon valmistaja integroi osaksi muuta ajoneuvojärjestelmää.

Usean moduulitoimittajan osallistuminen kokonaisuuden rakentamiseen hankaloittaa toimivan oikosulku- ja ylivirtasuojauksen mitoittamista, koska osatoimittajilla ei välttämättä ole suoraa yhteyttä toisiinsa. Kommunikointipuute johtaa suojauksien tarkasteluun vain oman osakokonaisuuden kannalta, vaikka ajoneuvossa eri moduulit on liitetty yhteen ja muodostavat näin systeemin, jonka suojausta tulisi tarkastella kokonaisuutena.

2.2 Tasasähkökatkoja

Työssä käytettävän tasasähkökatkojan topologia on esitetty kuvassa 2. Kuten kuvasta nähdään, se koostuu kolmesta rinnankytketystä puolisolttakatkajasta. Kyseinen topologia on valittu, koska se voidaan toteuttaa suoraan vaihtosuuntaajamoduulia muokkaamalla.



Kuva 2. Työssä käytetyn tasasähkökatkojan topologia

Jännitevälipiiri on suuritehoisissa sovelluksissa kondensaattoripaketti, joka koostuu sarjaan- ja rinnankytketyistä kondensaattoreista. Kytkenällä kondensaattoripaketin jännitekesto ja kapasitanssia eli energianvarastointikapasiteettia voidaan kasvattaa. Kondensaattoripaketin tarkoituksena on toimia hetkellisenä energiavarastona moottoria ohjaavalle vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaajan toiminta ja komponenttien jännitekestoisuus edellyttävät, että välipiirin jännite pysyy ennalta määriteltyjen rajojen sisällä. Välipiirin jännitteen muutokselle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\Delta U_d = \sqrt{\frac{2W}{C_v}} \quad (1)$$

jossa U_d on välipiirin jännitteen tehollisarvo
 W on energia
 C_v on välipiirin kapasitanssi

Yhtälöstä (1) nähdään, että jarrutusenergian syöttäminen välipiiriin kasvattaa sen jännitettä. Sitä vastoin energian kuluttaminen välipiiristä laskee sen jännitettä. Koska jännitteen on pysyttävä tiettyjen rajojen sisällä, energiaa on kyettävä tarvittaessa syöttämään lisää välipiiriin tai kuluttamaan sitä. Liikennevälinekäytössä paras tapa kuluttaa ylimääräinen energia välipiiristä on siirtää se takaisin energiavarastoon. Tämä vaatii syöttöyksiköltä kykyä kaksisuuntaiseen tehonsiirtoon energiavaraston ja jännitevälipiirin välillä. Työssä käytettävä tasasähkökatkoja mahdollistaa kuvatuunlaisen toiminnan. [1] [2]

Riippuen siitä, halutaanko energiaa siirtää energiavarastoon vai välipiiriin, tasasähkökatkoja toimii joko jännitettä nostavana katkojana tai jännitettä laskevana katkojana. Välipiirin jännitteen pudotessa säädön alarajalle, kytkinkomponentit $IGBT_{2,4,6}$ ohjataan johtaviksi, jolloin virta kasvaa lineaarisesti kuristimien $L_1 - L_3$ yli varastoiden niihin energiaa. Kun kytkinkomponentit $IGBT_{2,4,6}$ sammutetaan, induktiivinen virta ei voi katketa äkisti, vaan se kommutoi kulkemaan diodien $D_{1,3,5}$ kautta. Tällöin kuristimiin ja energiavarastoon varastoitunut energia siirtyy välipiiriin nostaen sen jännitettä. Tasasähkökatkojan sanotaan toimivan tällöin jännitettä nostavana katkojana. [2] [3]

Välipiirin jännitteen noustessa liian korkeaksi, kytkinkomponentit $IGBT_{1,3,5}$ ohjataan johtaviksi, jolloin virta kasvaa lineaarisesti kuristimien $L_1 - L_3$ yli, varastoiden energiaa kuristimiin sekä energiavarastoon nostaen sen jännitettä. Kun kytkinkomponentit $IGBT_{1,3,5}$ sammutetaan, induktiivinen virta ei voi katketa äkisti vaan se kommutoi kulkemaan diodien $D_{2,4,6}$ kautta. Tällöin osa kuristimiin varastoituneesta energiasta siirtyy energiavarastoon nostaen sen jännitettä. Tasasähkökatkojan sanotaan toimivan jännitettä laskevana katkojana. [2]

Toistamalla edellä esiteltyjä kytkentäsyklejä ja käyttämällä kytkimien ohjauksessa pulssinleveysmodulaatiota, välipiirin ja energiavaraston jännite voidaan pitää sallittujen rajojen sisällä. Lisäksi kuvatuslainen toiminta jännitettä nostavana ja laskevana katkojana vaatii välipiirin jännitteen pysymisen jatkuvasti korkeampana kuin energiavaraston jännite [4].

Joissakin tilanteissa välipiiriin varastoitunutta ylimääräistä energiaa ei pystytä siirtämään energiavarastolle, jolloin välipiirin jännite nousee liian korkeaksi. Tällaisia tilanteita voi syntyä esimerkiksi energiavaraston ollessa täysi tai ajoneuvon sähköjarrutuksen tapahtuessa niin suurella teholla, ettei energiavarasto kykene käsittelemään sitä. Välipiirin jännitettä voidaan pienentää käyttämällä kuvassa 1 näkyvää jarrukatkojaa kunnes jännite on pudonnut asetetun ylijänniterajan alapuolelle. Jännitevälipiirin ylimääräinen energia muuttuu jarruvastuksessa lämmöksi.

3 Ylivirtatilanteet

Ylivirtatilanteet voidaan jaotella kahteen osaan. Ylikuormitustilanteessa virta kulkee piirissä suunniteltua reittiä pitkin, eli kaapeleissa ja komponenteissa. Oikosulkutilanteessa virta kulkee suunnitellun reitin ulkopuolella esimerkiksi eristevian seurauksena. [5] [6]. Kohdissa 3.1 ja 3.2 esitellään yleisellä tasolla ylikuormitus- ja oikosulkutilanteet sekä niihin liittyvät suojausvaatimukset. Kohdassa 3.3 tarkastellaan esimerkkejä energiavaraston ja tasasähkökatkojan muodostaman piirin oikosulkutilanteista.

3.1 Ylikuormitus

Ylikuormitustilanteella tarkoitetaan tilannetta, jossa piirin johtimissa kulkee nimellisvirtaa suurempi virta. Karkeasti voidaan arvioida, että ylivirran suuruus jää pienemmäksi kuin kymmenkertainen nimellisvirta [7].

Ylikuormitustilanteet voidaan jaotella kahteen osaan. Piirin normaaliin toimintaan kuuluviin lyhytaikaisiin ylikuormitustilanteisiin ja jatkuviin ylikuormitustilanteisiin, jotka eivät kuulu piirin normaaliin toimintaan.

Lyhytaikaisia ylikuormitustilanteita voi esiintyä esimerkiksi oikosulkumoottorin käynnistyksen yhteydessä. Nämä tilanteet ovat niin lyhytkestoisia, etteivät ne ehdi nostaa piirin komponenttien lämpötilaa merkittävästi, eivätkä näin vahingoita niitä. Piirin suojauksen ei tule reagoida normaaleihin ylikuormitustilanteisiin.

Piirin normaaliin toimintaan kuulumattomia jatkuvia ylikuormitustilanteita aiheuttavat esimerkiksi kuluneet moottorilaakeroinnit tai liiallisen kuorman kytkeminen piiriin. Jatkuva ylivirta nostaa komponenttien lämpötilaa, joka aiheuttaa niille ylimääräistä räsytystä ja lopulta vahingoittaa komponentteja tai johtaa oikosulkutilanteeseen ylivirran jatkuessa riittävän pitkään. Piirin suojaukselta vaaditaan kykyä rajoittaa ylivirtatilanteen kesto sellaiseksi, etteivät suojattavat komponentit ehdi vahingoittua. Tyypillisesti kyseinen aikaikkuna vaihtelee sekunneista useisiin minuutteihin. [6] [7]

3.2 Oikosulku

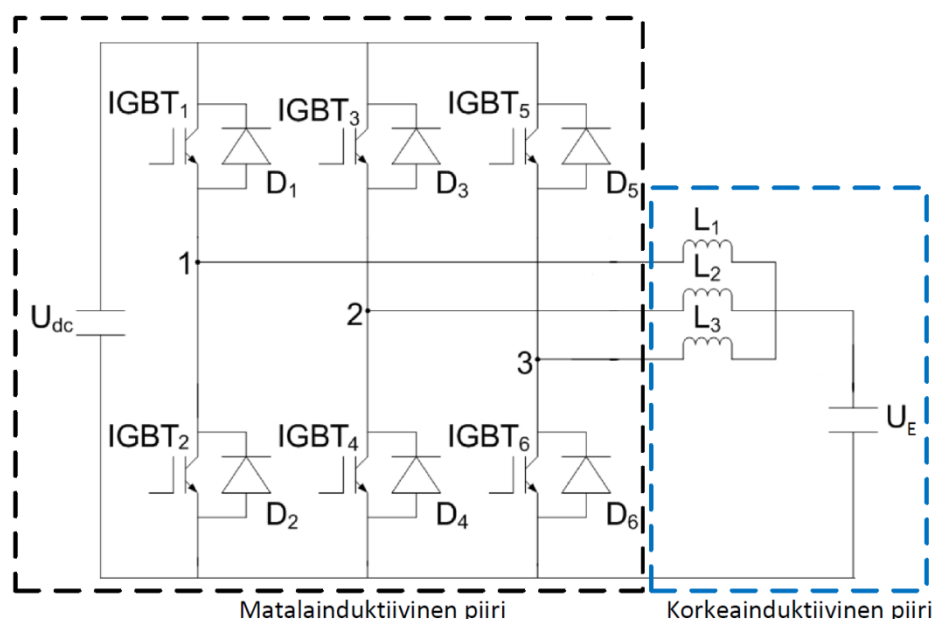
Oikosulkutilanne voi syntyä piiriin esimerkiksi komponenttien kuten puolijohteiden rikkoutuessa tai kaapelien eristysten pettäessä. Oikosulkuvirrat ovat tyypillisesti kymmeniä tai satoja kertoja suurempia kuin piirin nimellisvirta. Jos oikosulkuvirtaa ei

katkaista riittävän nopeasti, se voi aiheuttaa esimerkiksi kaapelien sulamisen, valokaaria, metallin höyrystymistä ja komponenttien vaarallisen tuhoutumisen.

Oikosulkuvirtojen vahinkojen arvioinnissa tarvitaan tietoa oikosulun kestosta sekä virran tehollis- ja hetkellisarvosta. Virran tehollisarvo määrittää komponentteihin kohdistuvan termisen rasituksen ja virran hetkellisarvo komponentteihin kohdistuvan mekaanisen rasituksen. Mekaaninen rasitus johtuu virtaa kuljettavien johtimien välisistä magneettisista voimista, jotka ovat suoraan verrannollisia virran hetkellisarvon neliöön. [6] [7]

3.3 Esimerkkejä tasasähkökatkojan oikosulkutilanteista

Tasasähkökatkojan tulo ja lähtö omaavat hyvin erisuuruiset induktanssit. Kuvassa 3 on esitetty jaottelu matalainduktiiviseen ja korkeainduktiiviseen osuuteen. Kuten kuvasta nähdään, katkojan lähtö on hyvin pienen induktanssin omaava jännitevälipiiri. Katkojan tulo puolestaan koostuu suuren induktanssin omaavasta (tyypillisesti hybridityökoneissa $L > 100 \mu\text{H}$) kuristinpaketista ja energiavarastosta.



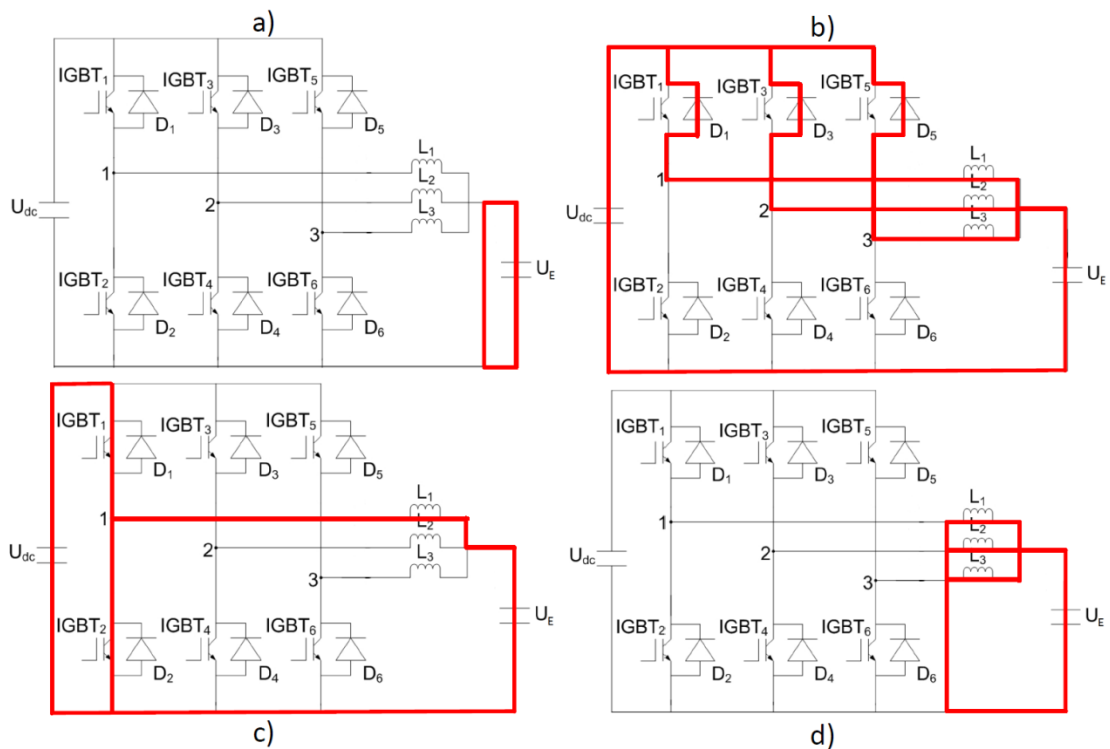
Kuva 3. Tasasähkökatkojan ja energiavaraston induktiivisuus

Virran katketessa induktanssin yli, se pyrkii pitämään virran jatkuvana indusoimalla virran muutosta vastustavan sähkömotorisen voiman. Koska induktanssin aiheuttama sähkömotorinen voima on suoraan verrannollinen induktanssin suuruuteen ja virran katkeamisnopeuteen, tehoasteen induktanssi pyritään minimoimaan. Jos tehoasteen induktanssi olisi korkea, se synnyttäisi tehopuolijohteen tuhoavan jännitepiikin kytkimen katkaistessa virran nopeasti. Katkojan toiminnan kannalta lähdössä on

oltava induktanssia, koska muutoin jännitevälipiiri ja energiavarasto olisivat oikosulussa. Tällöin virta kasvaisi hallitsemattomasti samalla tuhoten tehopuolihohteet. Induktanssi toimii myös katkojan energiavarastona.

Kuvassa 4 on esitelty esimerkkejä mahdollisista oikosulkutilanteista. Kuvan 4 a) tilanteessa akkupiiri on oikosulkeutunut. Kuvan 4 b) tilanteessa oikosulku on tapahtunut esimerkiksi välipiirissä. Tässä tilanteessa välipiirin jännite putoaa energiavaraston jännitettä alemmaksi, joten puolislitakatkojan vastarinnankytketyt diodit alkavat johtaa oikosulkuvirtaa energiavarastolta kuristinpaketin lävitse välipiiriin. Puolisiltakatkojan ohjatut tehopuolihohteet eivät siis pysty eristämään vikapistettä.

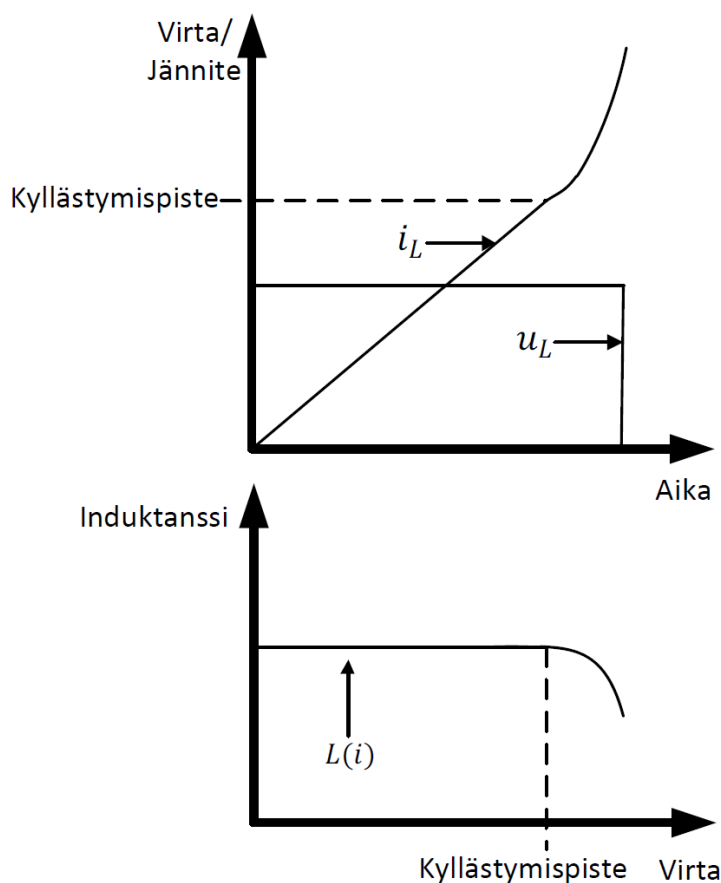
Kuvan 4 c) oikosulkutilanne on katkojan haaran läpisytytys, oikosulkuvirta kulkee yhden kuristimen ja välipiirin läpi. Tilanteen jatkuessa riittävän pitkään, välipiirin jännite putoaa alemmaksi kuin energiavaraston jännite ja siirrytään kuvan 4 b) tyyppiseen tilanteeseen jossa diodit alkavat johtaa. Kuvan 4 d) tilanteessa kuristinpaketti on oikosulkeutunut paluujohtimen kautta energiavarastoon. Edellä olevista esimerkeistä voidaan päätellä, että puolislitakatkojan ja energiavaraston muodostamassa kokonaisuudessa voi tapahtua useita erilaisia ja erisuuruisen oikosulkuimpedanssin omaavia oikosulkuja.



Kuva 4. Puolisiltakatkojan ja energiavaraston mahdollisia oikosulkutilanteita: a) akkupiirin oikosulku b) välipiirin oikosulku c) puolislitakkojan läpisytytys d) kuristin paketin ja akkupiirin oikosulku

Kuristinpaketille asetettujen induktanssi- ja kokovaatimusten sekä tehopuolijohteiden asettamien rajoitusten takia kuristimessa on tyypillisesti käytettävä ferromagneettista sydänmateriaalia riittävän suuren induktanssin saavuttamiseksi. Ferromagneettisen sydämen käyttäminen johtaa siihen, että kuristimen induktanssi riippuu sen läpi kulkevasta virrasta. Kuvassa 5 on esitetty kuristimen kyllästymiseksi kutsutun ilmiön käyrämuodot. Kuvasta nähdään, että virran kasvaessa riittävän suureksi, kuristimen induktanssi alkaa pienentyä ja virran aikaderivaatta kasvaa. Kyllästymispisteeseen ja induktanssin laskunopeuteen voidaan vaikuttaa sydämen suunnittelulla esimerkiksi ilmaväliä muuttamalla ja sydänmateriaalin valinnalla.

Kuristimen kyllästyminen monimutkaistaa oikosulkuvirtojen laskentaa ja oikosulkusuojan mitoituksessa tarvittavan oikosulkupiirin induktanssien määrittämistä. Kuristimen mitoituksesta riippuen kyllästymisilmiön huomioon ottaminen saattaa olla tarpeellista oikosulkuvirtaa laskettaessa tai virta voi todellisessa oikosulkutilanteessa nousta laskettua suuremmaksi ennen kuin oikosulkusuoja ehtii toimia.



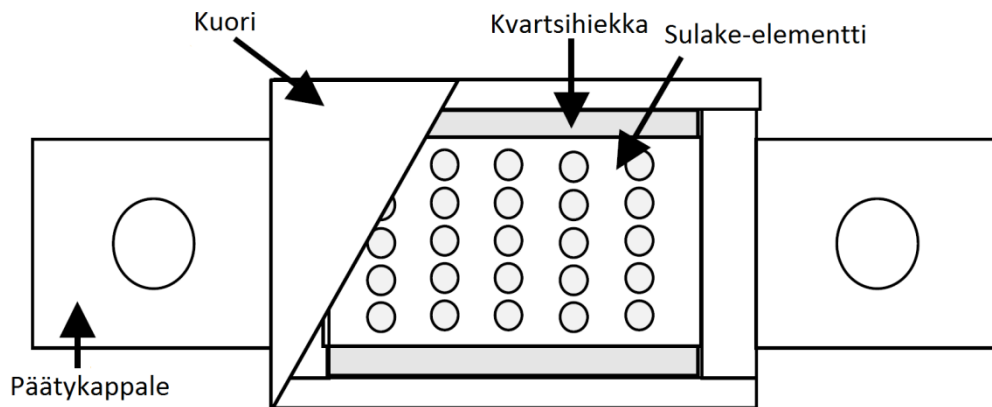
Kuva 5. Kuristimen kyllästymisilmiö

4 Suojalaitteet

Piirissä olevien suojalaitteiden tehtävänä on katkaista piirin virta vikatapauksessa ja erottaa vikaantunut osa muusta piiristä lisävahinkojen ehkäisemiseksi. Tässä luvussa esitellään hybridiajoneuvokäytöissä ylivirta- ja oikosulkusuojaukseen käytetyt suojalaitteet ja käydään läpi niiden mitoittamiseen liittyviä seikkoja. Kohdassa 4.1 esitellään sulakkeen rakenne, tämän jälkeen kohdassa 4.2 esitellään yleisesti sulakkeen toimintaperiaate ja sen jälkeen keskitytään nopean sulakkeen toiminnan tarkempaan tutkimiseen. Tämän jälkeen kohdassa 4.3 tarkastellaan sulakkeen mitoittamista vaihtosähköpiiriin ja erityisesti tasasähköpiiriin. Kohdassa 4.4 tutustutaan nopean sulakkeen piirisimulaattorimalliin ja kohdassa 4.5 käydään läpi DC-kontaktorin rakenne ja toimintaperiaate sekä esitellään sähköajoneuvoissa yleisesti käytetty kontaktorityyppi.

4.1 Sulakkeen rakenne

Nopean sulakkeen rakenne on esitetty kuvassa 6. Sulakkeen kuori on valmistettu mekaanisesti kestävästä, lämpötilavaihteluja sietävästä ja sähköä eristävästä materiaalista. Materiaali on yleensä keraamista tai lasista, mutta myös lasilla vahvistetut muovikuoret ovat yleistyneet viime aikoina. [5]



Kuva 6. Nopean kahvasulakkeen rakenne (mukailtu lähteestä [7])

Sulakkeen toiminnan kannalta tärkein osa on sulake-elementti. Se on ohut rei'itetty nauha, joka on kiinnitetty molemmista päädyistään päätykappaleisiin [8]. Koska sulakkeen ominaisuuksiin ja toimintaan vikatilanteessa vaikuttavat elementin muotoilu ja materiaalivalinnat, tärkeätä on, että nämä säilyvät muuttumattomina koko sulakkeen eliniän ajan. Nauhan materiaalina on lähes yksinomaan käytetty puhdasta hopeaa tai hopealla päällystettyä kuparia. Materiaalit omaavat hyvän korroosiokestävyyden, joten elementtien ominaisuudet pysyvät stabiileina koko

eliniän ajan. Tosin viime vuosina puhtaasta kuparista valmistetut nauhat ovat yleistyneet. Hyvä korroosiokestävyys puhtaalla kuparilla on saavutettu suunnittelemalla nauhan toimintalämpötila nimellisvirralla alhaiseksi. [5]

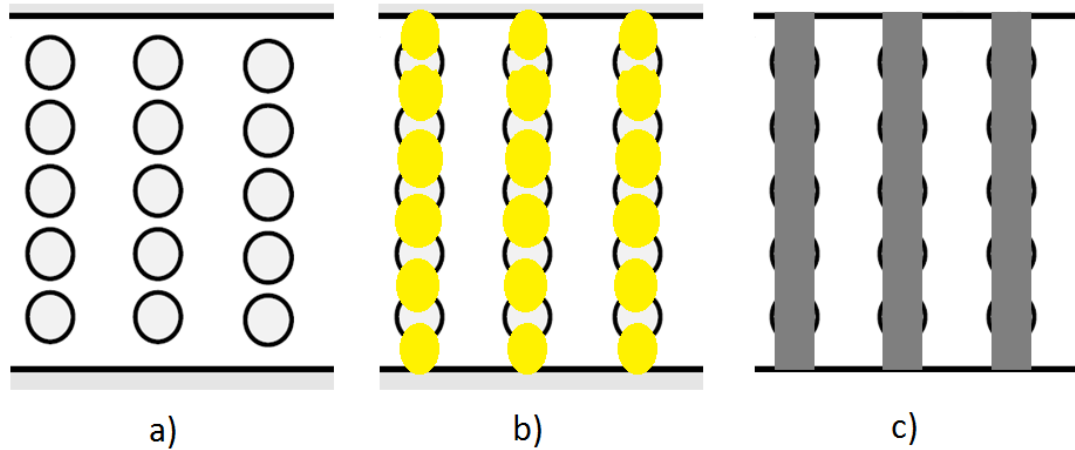
Kuori on täytetty erittäin puhtaalla kvartsihiekillä, joka ympäröi sulake-elementtiä. Kvartsihiekan tehtävänä on normaalitilanteessa johtaa lämpöä sulake-elementistä ympäristöön. Vikatilanteessa hiekka avustaa valokaarien sammutuksessa sekä sulaa sulake-elementille. Sulanut hiekka katkaisee virran kulkureitin ja muodostaa eristekerroksen. [8]

4.2 Sulakkeen toimintaperiaate

Suojattavan piirin toimiessa normaalisti, sulakkeen läpi kulkeva virta nostaa sulakkeen lämpötilaa sulake-elementissä tapahtuvien resistiivisten häviöiden takia. Oikein mitoitettu sulake kestää tämän ja lisäksi piirissä mahdollisesti esiintyvät hetkittäiset ylivirtapulssit sulakkeen ominaisuuksien muuttumatta. [8]

Kuvassa 7 on esitetty sulake-elementin toiminta eri tilanteissa. Sulakkeen läpikulkevan virran ollessa kyllin suuri ja kestäessä riittävän pitkään, sulake-elementtiin tehtyjen ohennettujen kaulojen lämpötila kasvaa muuta elementtiä nopeammin. Sulamisajan t_s jälkeen metallin sulamislämpötila ylittyy ja kaikki kaulat sulavat ideaalitapauksessa yhtä aikaa. [7] [8]

Kaulojen sulamisen jälkeen virta jatkaa kulkuaan sulassa metallissa samalla lämmittäen sitä lisää. Lämpötilan noustessa tarpeeksi korkeaksi, metalli saavuttaa höyrystymispisteen. Metallin höyrystyessä, virtatiehen muodostuu katkos. Koska piirissä on hajainduktanssia, virta ei voi katketa äkisti, vaan jännite nousee höyrystymisen takia syntyneiden aukkojen yli. Väliaineen läpilyöntilujuuden ylittyessä syttyvät valokaaret kuvan 7 b) esittämällä tavalla. Sulamisajan t_s voidaan sanoa päättyneen. [5]



Kuva 7. Sulake-elementin toimintaperiaate: a) normaalitilanteessa b) valokaarien palaessa c) sulakkeen katkaistua piirin virta (mukailtu lähteestä [7])

Sulake voi käyttää hyväkseen vaihtovirran luonnollisia nollakohtia valokaarien sammutuksessa tai toimia virtaa rajoittavasti. Tällöin valokaaret sammuvat ja piirin virta katkeaa, ennen kuin se saavuttaa huippuarvonsa. Virtaa rajoittavaa sulaketta kutsutaan nopeaksi sulakkeeksi ja pelkästään vaihtovirran luonnollisia nollakohtia hyväksikäyttävää hitaaksi sulakkeeksi. On myös mahdollista rakentaa sulaketyyppi, joka toimii sekä hitaasti että nopeasti katkaistavan virran suuruudesta riippuen. [8]

Valokaarien syttyessä syntyy reikien yli valokaarijännite. Tällöin nopean sulakkeen toiminta voidaan esittää kuvan 8 mukaisen sijaiskytkennän avulla. Sijaiskytkennän perusteella piirin toiminnalle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$u_{ac}(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + u_a(t) \quad (2)$$

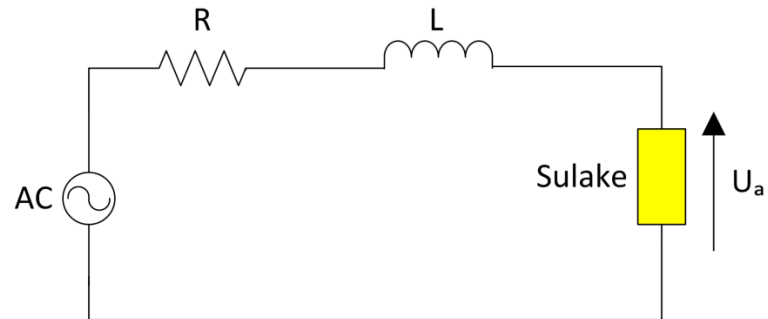
jossa u_{ac} on oikosulkua syöttävän jännitelähteen hetkellisarvo
 u_a on sulakkeen jännitteen hetkellisarvo
 i on virran hetkellisarvo
 R on piirin resistanssi
 L on piirin induktanssi

Oletetaan resistanssin yli oleva jännitehäviö $Ri(t)$ pieneksi ja ratkaistaan yhtälöstä (2) virran aikaderivaatta

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u_{ac}(t) - u_a(t)}{L} \quad (3)$$

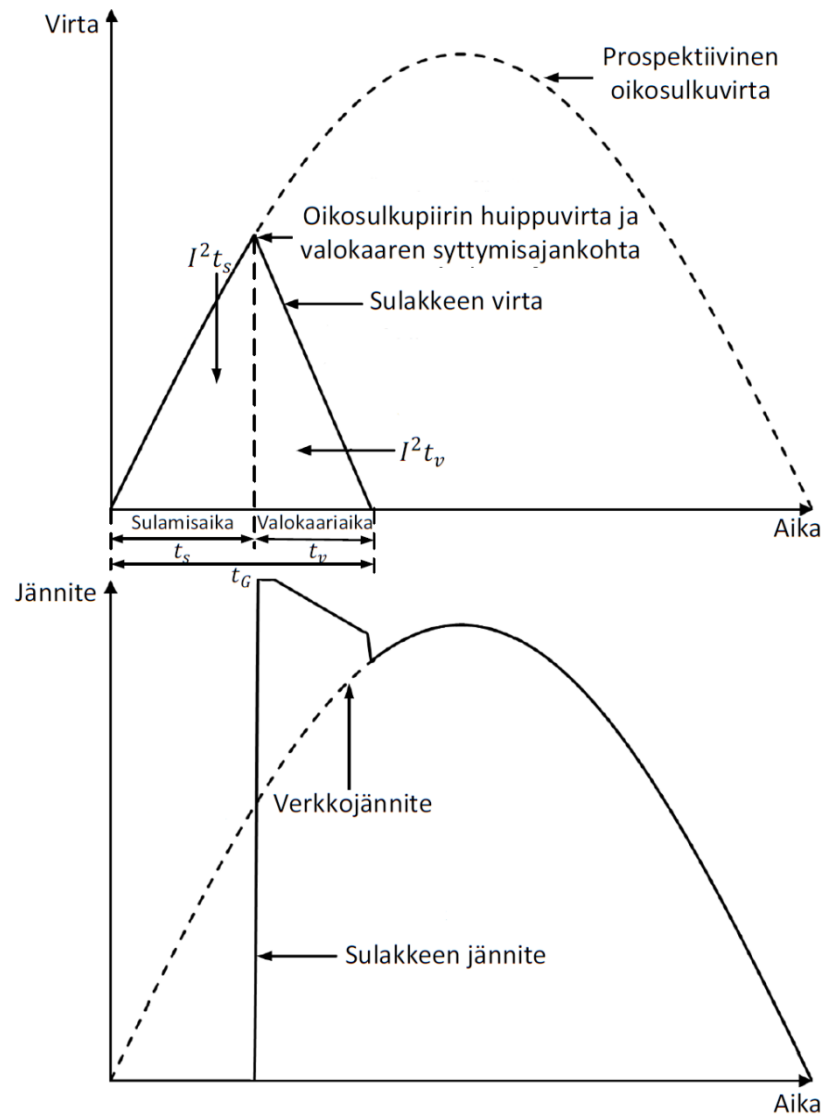
Yhtälöstä (3) nähdään, että virran aikaderivaatta on negatiivinen, mikäli ehto $u_a(t) > u_{ac}(t)$ toteutuu. Ehdon toteutumiseksi ja siten nopean sulakkeen oikealle toiminnalle on olennaista, että sulake-elementtiin syttyy tarpeeksi valokaaria sarjaan.

Tällöin valokaarijännitteiden summa ylittää oikosulkua syöttävän jännitelähteen jännitteen ja virta alkaa laskea kohti nollaa.



Kuva 8. Oikosulkutilanteen sijaiskytkentä (mukailtu lähteestä [7])

Aikaa, joka kuluu sulamisajan lopusta virran katkaisuun, kutsutaan valokaariajaksi t_v . Sulamis- ja valokaariajan summaa kutsutaan kokonaistoiminta-ajaksi t_G . Kuvassa 9 on esitetty sulakkeen virran ja jännitteen käyrämuodot sulamis- ja valokaariajan aikana. Kuvassa näkyvä prospektiivinen oikosulkuvirta on virta, joka piirissä kulkisi, mikäli sulake ei rajoittaisi virran nousua. [7] [8]



Kuva 9. Nopean sulakkeen virta ja jännite oikosulkutilanteessa (mukailtu lähteestä [4])

Kvartsihiekkan tehtävänä on valokaarivaiheessa avustaa valokaarien sammutuksessa. Valokaarien palaessa metallia höyrystyy lisää ja sulakkeen sisäinen paine kasvaa. Tämä helpottaa valokaarien sammutusta, mutta sulakkeen kuori saattaa hajota valokaariajan pitkittyessä. Kvartsihiekkä imee itseensä sulaa metallia ja päästää metallihöyryjä lävitseen estäen sulakkeen sisäisen paineen kasvamisen liian suureksi. Valokaarijännitteen pakotettua piirin virta riittävän alas, valokaarien sammuminen ja siten piirin virran katkaisu tulee mahdolliseksi. [8]

Valokaarivaiheen päätyttyä, valokaaren kanssa kosketuksissa ollut kvartsihiekkä on sulanut ja jähmettynyt virtatielle korkearesistanssiseksi eristekerrokseksi kuvan 7 c) esittämällä tavalla. Syntynyt eristekerros katkaisee virtatien ja estää valokaarien uudelleensyttymisen. [7] [8]

4.3 Sulake tasasähköpiirissä

4.3.1 Sulamiskäyrä

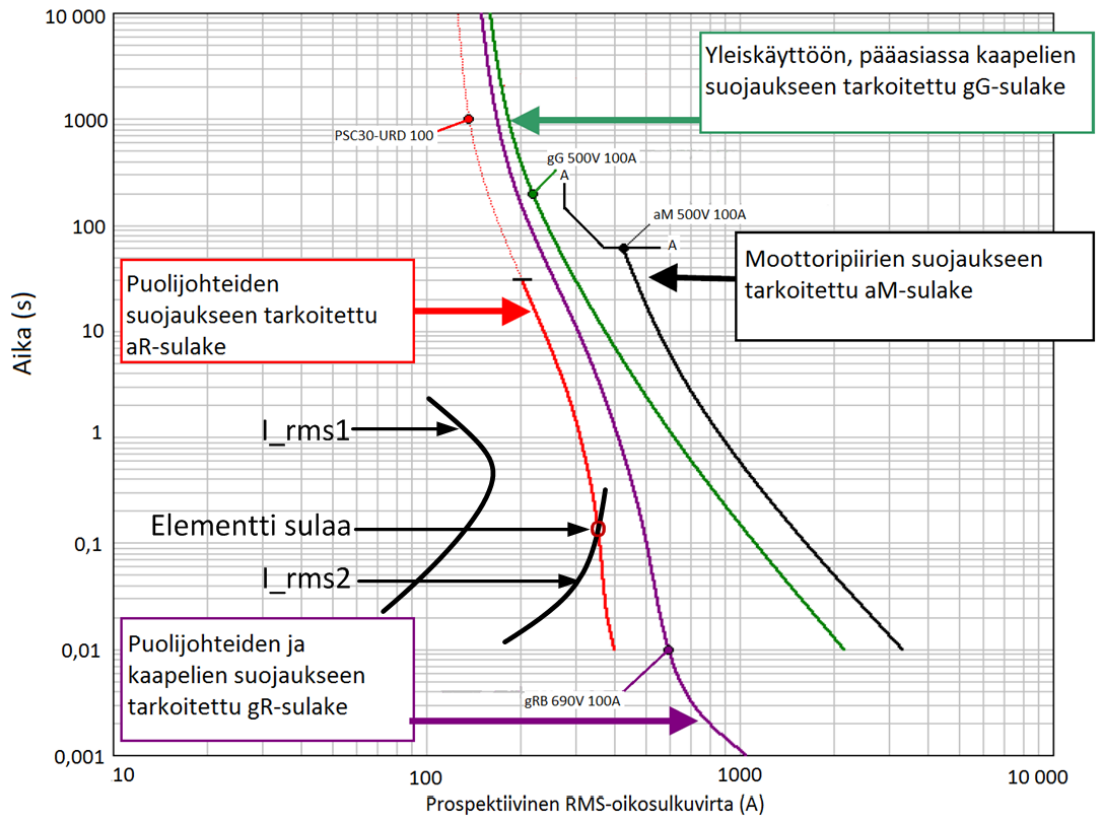
Sulakevalmistajilla on tarjolla erityyppisiä sulakkeita suojauskohteiden erilaisten vaatimuksien täyttämiseksi, esimerkiksi puolijohteiden suojaukseen soveltuvia nopeasti sulavia sulakkeita tai moottorien suojaamiseen soveltuvia hitaammin sulavia sulakkeita. Sulakkeen tyyppikoodi koostuu kahdesta kirjaimesta. Ensimmäinen kirjain ilmaisee sulakkeen katkaisualueen ja soveltuuko se ainoaksi suojalaitteeksi käyttökohteeseen.

Koko virta-alueella katkaisevaa ja siten piirin ainoaksi suojaksi soveltuvaa sulaketta kutsutaan g(general)-luokan sulakkeeksi. Ainoastaan suurella virralla toimivaa sulaketta eli pelkästään oikosulkusuojaukseen soveltuvaa sulaketta kutsutaan a(associated)-luokan sulakkeeksi. Tyyppikoodin toinen kirjan kertoo millaisen käyttökohteen suojaukseen sulake on suunniteltu, esimerkiksi R-tyyppinen puolijohteiden suojaukseen ja M-tyyppinen moottorien suojaukseen. [7]

Kuvassa 10 on esitetty erityyppisten sulakkeiden sulamiskäyrästä ja prospektiivisen oikosulkuvirran tehollisarvon funktiona. Kuvaan piirrettyjen sulakkeiden nimellisvirta on sama 100 A ja jännitekestoisuus vaihtelee 500 V–690 V välillä.

Valmistajat varustavat a-luokan sulakkeiden sulamiskäyrästä A-A-rajakäyrällä, jonka yläpuolelle jäävä osuus on yleensä piirretty katkoviivalla. Sulakkeen joutuessa toimimaan rajakäyrän sisäpuolella, sen sulamiskäyrä riippuu voimakkaasti ympäristölämpötilasta ja jäähtymisestä. Toimittaessa rajakäyrän ulkopuolella sulakevalmistaja takaa, ettei sulake tuhoudu. A-A-käyrän asema riippuu myös ympäristölämpötilasta. Toimittaessa sulakevalmistajan ilmoittamaa testilämpötilaa korkeammilla lämpötiloilla käyrää joudutaan siirtämään. A-luokan sulake ei siten sovellu ylikuormitustilanteiden tai hitaasti kasvavien oikosulkuvirtojen katkaisuun. Haluttaessa katkaista virtoja koko virta-alueella on käytettävä g-luokan sulaketta tai sulamiskäyrän avulla koordinoita esimerkiksi kontaktori ja a-luokan sulake tarjoamaan suojaus koko virta-alueelle. [8]

Kuten kuvasta 10 nähdään, pienillä virroilla sulamisaika on pitkä, joten valokaariajan vaikutus sulakkeen kokonaistoiminta-aikaan on suhteessa pieni. Myöskään virran aaltomuoto eikä vikaantumishetki vaikuta sulamiskäyrän muotoon pienillä virroilla. [5]



Kuva 10. Erityyppisten sulakkeiden sulamiskäyrästäjä (mukailtu lähteestä [7])

Sulamiskäyrästä nähdään kestäkö sulake esimerkiksi piirissä esiintyvän ylivirtapulssin sulamatta ja a-luokan sulakkeen tapauksessa, toimiiko se turvallisella alueella. Kuvasta 10 nähdään, että esimerkiksi moottoreiden suojaukseen tarkoitettu aM-sulake kestää oikosulkumoottorin käynnistyksen yhteydessä esiintyvän ylivirtapulssin paremmin kuin puolijohteiden suojaukseen tarkoitettu aR-sulake.

Koska virran sulake-elementtiin kohdistama lämmitysvaikutus ja siten elementin sulamisnopeus riippuu virran tehollisarvosta, esimerkiksi mitatusta ylivirtapulssista on laskettava muutostilanteen lämmitysvaikutusta kuvaava ns. liukuva tehollisarvo. Mielivaltaiselle virran käyrämuodolle voidaan laskea liukuva tehollisarvo yhtälöllä

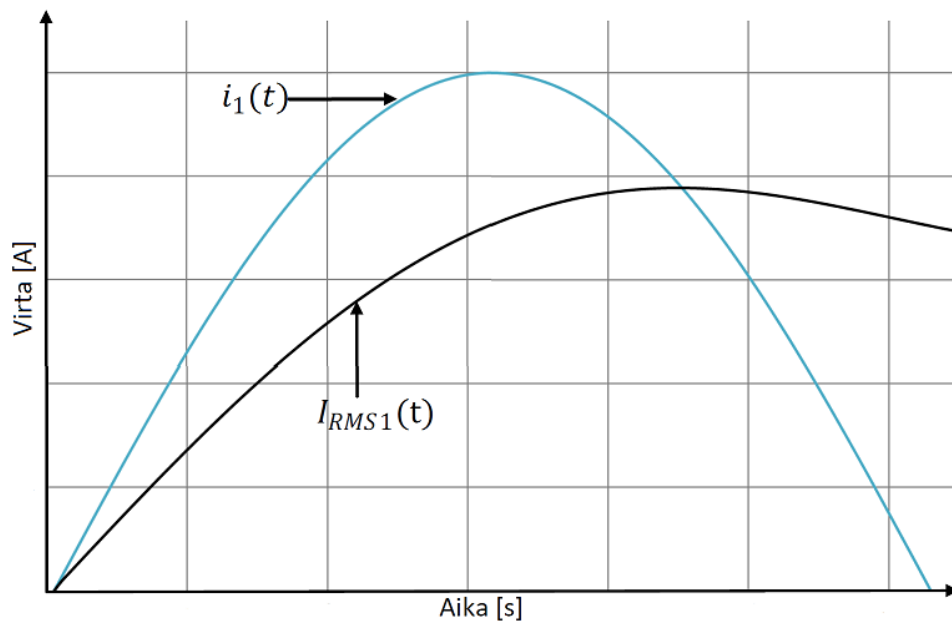
$$I_{rms}(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{k=1}^n i_k(k)^2} \quad (4)$$

jossa I_{rms} on virran tehollisarvo

i on virran diskreetti hetkellisarvo

Kuvassa 11 on havainnollistettu virran hetkellisarvon ja siitä yhtälöllä (4) lasketun liukuvan tehollisarvon eroa. Kuvasta nähdään, että virran hetkellisarvo nousee nopeammin kuin liukuva tehollisarvo.

Kuvan 10 sulamiskäyrän x-akseli ”Prospektiivinen RMS-oikosulkuvirta” voidaan korvata oikosulkuvirran tehollisarvolla I_{RMS} sulamiskäyrän muuttamatta muotoaan. Tämä mahdollistaa sen, että virtapulssin liukuvan tehollisarvon määrittämisen jälkeen se voidaan piirtää sulamiskäyrään. Kuvaan 10 on piirretty virtapulssien I_{RMS1} ja I_{RMS2} liukuvat tehollisarvot. Kuten kuvasta nähdään virtapulssi I_{RMS2} leikkaa sulamiskäyrän ja sulake-elementti sulaa. Mikäli piirretty käyrä ei leikkaa sulamiskäyrää, sulake-elementti kestää virtapulssin sulamatta [6].



Kuva 11. Virran hetkellisarvon ja liukuvan tehollisarvon vertailu ajan funktiona

4.3.2 Tasasähköpiirin oikosulku ja sulakkeen toiminta

Tasasähköpiirin oikosulussa virta noudattaa yhtälöä

$$i_{RL}(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

jossa U on oikosulkua syöttävän jännitelähteen tehollisarvo

i on virran hetkellisarvo

R on oikosulkupiirin resistanssi

L on oikosulkupiirin induktanssi

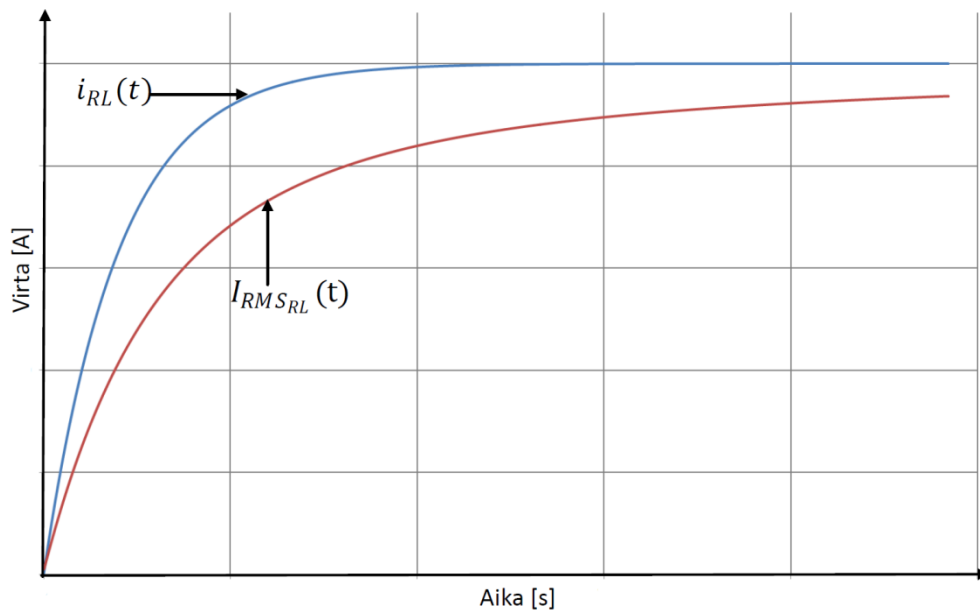
t on aika

τ on aikavakio

Yhtälöstä (5) voidaan johtaa tasasähköpiirin oikosulkuvirran liukuva tehollisarvo

$$I_{RMS_{RL}}(t) = \frac{U}{R} \sqrt{1 + \frac{2e^{-\frac{t}{\tau}}}{t/\tau} - \frac{e^{-\frac{2t}{\tau}}}{2t/\tau} - \frac{1,5}{t/\tau}} \quad (6)$$

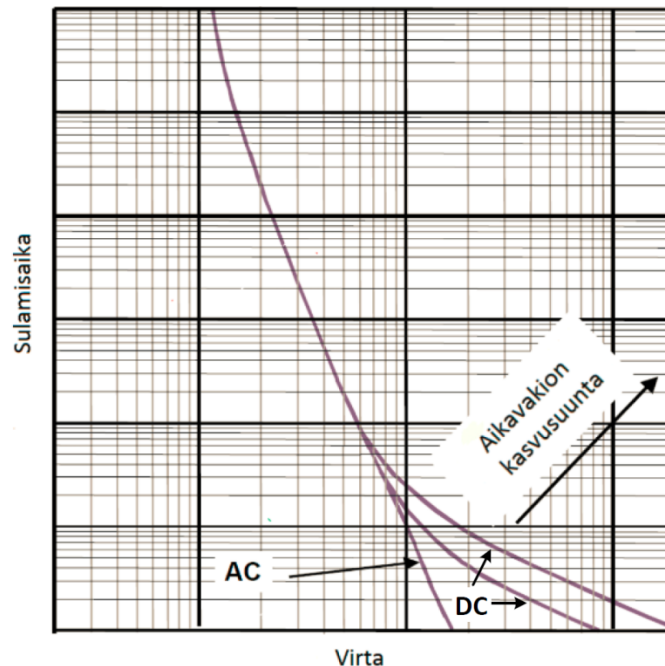
Annettaessa ajan lähestyä ääretöntä yksinkertaistuu yhtälö (6) pysyvän tilan tehollisarvoksi ($I_{RMS_{RL}}(\infty) = \frac{U}{R}$), joka tasavirralla vastaa sen hetkellisarvoa. Virran hetkellis- ja tehollisarvon eroa muutostilanteessa on havainnollistettu kuvassa 12. Yhtälöstä (5) nähdään, että oikosulkuvirran huippuarvo on riippuvainen oikosulkua syöttävän jännitelähteen ja resistanssin suhteesta $I_p = \frac{U}{R}$. Kuten yhtälöstä (6) nähdään, oikosulkupiirin virran liukuvan tehollisarvon nousunopeus on riippuvainen oikosulkupiiriin aikavakiosta $\tau = \frac{L}{R}$. Aikavakio vaikuttaa myös virran laskunopeuteen valokaarijännitteen pakottaessa virran kohti nollaa, kuten yhtälöstä (5) voidaan päätellä. Oikosulkuvirtojen laskemiseksi on siis tunnettava oikosulkua syöttävä jännitelähde, oikosulkupiirin resistanssi ja induktanssi.



Kuva 12. RL-piirin virran hetkellisarvo ja siitä laskettu liukuva tehollisarvo

Virtaa rajoittava sulake toimii samalla tavalla tasasähkö- ja vaihtosähköpiirien oikosulkutilanteissa, eli sulakkeen valokaarijännitteiden on kyettävä pakottamaan piiriin virta nolnaan tasasähköpiiriin ja vaihtosähköpiiriin oikosulkutilanteissa. Tässä oletuksena on, että sulake toimii vaihtosähköpiirissä niin nopeasti, ettei virran ja jännitteen nollakohtia ehditä saavuttaa kuten esimerkiksi kuvassa 9 esitettyssä tilanteessa.

Sulake-elementin lämpeneminen on verrannollinen virran tehollisarvoon, joten eri aikavakion ja huippuvirran arvoilla sulake-elementin ohennetut kaulat saavuttavat sulamispisteen eri nopeudella. Tämä vaikuttaa sulamiskäyrästäihin kuvassa 13 esitetyllä tavalla. Kuten kuvasta 13 nähdään, pitkillä sulamisajoilla ($t_s > 1\text{ s}$) vaihto- ja tasasähkökäyrästä yhtyvät, mutta nopeilla toiminta-ajoilla, eli suurilla prospektiivisen oikosulkuvirran arvoilla aikavakion merkitys kasvaa. Suuren aikavakion omaavassa oikosulkupiirissä, sulakkeen sulamisaika voi olla merkittävästi pidempi, kuin saman prospektiivisen oikosulkuvirran omaavassa vaihtosähköpiirissä virran hitaasta nousunopeudesta johtuen. [5] [6]



Kuva 13. Aikavakion vaikutus sulamisaikaan (mukailtu lähteestä [6])

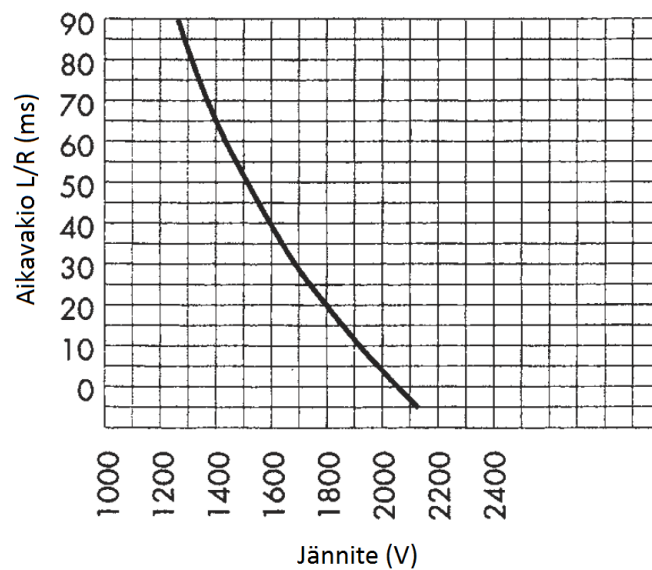
Mitä kauemmin sulake-elementillä kestää saavuttaa sulamispiste, sitä enemmän energiaa oikosulkupiiriin induktansseihin ehtii varastoitua muutostilanteen aikana. Sulakkeeseen syttyvien valokaarien on kyettävä absorboimaan induktansseihin varastoitunut energia. [6] [9]

Sulakkeen kykyyn absorboida energia valokaari-prosessin aikana vaikuttaa sulakkeelle ilmoitettu DC-jännite ja oikosulkupiiriin aikavakio. Sulake pystyy absorboimaan turvallisesti vain tietyn määrän valokaarien kehittämää energiaa. Liian pitkä valokaariaika johtaa sulakkeen lämpötilan kasvuun. Korkea lämpötila kehittää sulakkeen sisälle painetta, joka voi johtaa sulakkeen räjähtämiseen. [9]

Toinen ongelma tasasähkön katkaisussa on se, ettei se sisällä luonnollisia virran ja jännitteen nollakohtia. Valokaarijännitteen tulee kyetä yksin pakottamaan piirin virta nollaan. Pienillä ylivirroilla tai hitaasti kasvavilla oikosulkuvirroilla, eli suuren aikavakion omaavassa piirissä kaikki sulake-elementin valokaaret eivät välttämättä

syty, joten valokaarijännite jää suunniteltua pienemmäksi. Suuren aikavakion omaavan piirin virta myös pienenee hitaasti varsinkin valokaarijännitteen jäädessä pieneksi. Valokaariaika pitkittyy ja sulake on vaarassa räjähtää. [8] [10] Sulakevalmistajat suosittelevatkin, ettei sulaketta käytettäisi ilman erikoissuunnittelua pienien virtojen katkaisuun tasasähköpiireissä [6].

Näiden seikkojen vuoksi sulakevalmistajat tarjoavat kuvan 14 mukaisia korjauskäyrästöjä sulakkeiden käyttämiseksi eri aikavakion omaavissa tasasähköpiireissä. Kuvasta 14 nähdään, että sulakkeelle sallittu maksimijännite on kääntäen verrannollinen oikosulkupiirin aikavakioon. Vaihtoehtoisesti sulakevalmistajat ilmoittavat, millä aikavakion arvoilla datalehtitiedot pätevät tai minkä standardin mukaan sulakkeet on testattu. [6] [8] [9] [10]



Kuva 14. Piirin aikavakion vaikutus sulakkeen nimellisjännitteeseen (mukailtu lähteestä [6])

4.3.3 I^2t -arvo

Sulake-elementin häviöenergia tietyllä aikavälillä voidaan määrittää yhtälöstä

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) dt \quad (7)$$

jossa W on energiamäärä
 R on resistanssi
 i on virran hetkellisarvo

Sulakkeen lämmönjohto-ominaisuudet ovat huonot, joten tarpeeksi suurella virralla lämpeneminen tapahtuu niin nopeasti, että lämpenemisprosessin voidaan olettaa olevan adiabaattinen. Sulake-elementti ei tällöin vaihda lämpöä ympäristön kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että energiamäärä, joka vaaditaan sulakkeen eri toimintapisteiden saavuttamiseksi, on lähes vakio. [8]

Edellä esitettyjen oletuksien lisäksi oletetaan, että resistanssi R on vakio ja virta $i(t) = I$. Tämän jälkeen voidaan yhtälö (7) kirjoittaa muodossa

$$I^2 t = \text{vakio} \quad (8)$$

Yhtälön (8) perusteella voidaan määrittää kullekin sulaketyypille ominainen, sen rakenteesta ja materiaaleista riippuvainen, ns. $I^2 t$ -arvo. Sulakkeelle voidaan määrittää kolme $I^2 t$ -arvoa, sulamisajan $I^2 t_s$ -arvo, valokaariajan $I^2 t_v$ -arvo ja näiden summasta muodostuva kokonais- $I^2 t_G$. [8]

Valmistajat ilmoittavat komponenteille, kuten puolijohteille niiden kestämän $I^2 t$ -arvon. Komponentti- ja sulakevalmistajan ilmoittamien $I^2 t$ -arvojen käyttö helpottaa ja yksinkertaistaa suojauksen koordinoitua toimivaksi. Sulakkeen $I^2 t_G$ -arvon ollessa alle komponenttivalmistajan ilmoittaman $I^2 t$ -arvon, sulake katkaisee virran oikosulkupiiristä ennen kuin komponentti ehtii hajota.

Sulakevalmistajan $I^2 t$ -arvot ovat määriteltä sulakkeen toiminnalle vaihtosähköpiirissä. Tasasähköpiiriä suojattaessa todelliset $I^2 t$ -arvot voivat olla valmistajan ilmoittamia vaihtosähköpiirin arvoja matalampia tai korkeampia riippuen jännitteestä, aikavakiosta ja virrasta. [5]

4.3.4 Sulakkeen mitoitus tasasähköpiiriin

Sulakesuojausta hyödynnetään useissa erilaisissa sovelluksissa, joten yleispätevää ohjeistusta sulakesuojauksen mitoittamiseen on mahdotonta antaa. Esimerkiksi puolijohdekomponentin onnistuneelle sulakesuojaukselle voidaan asettaa seuraavat mitoituskriteerit [5] [8]:

- 1) Suojattavan komponentin sallittu $I^2 t$ -arvo on suurempi kuin sulakkeen
- 2) Sulake kestää normaalissa käytössä esiintyvät kuormitukset
- 3) Sulakkeen toimiessa kytkennässä ei esiinny puolijohteiden jännitekestoisuuden ylittäviä jännitteitä
 - Valokaarijännitteen maksimiarvo selvitettävissä sulakevalmistajan tarjoamasta käyrästä
- 4) Sulakkeen katkaisukyky on riittävä

Periaatteessa kaikki sulakkeet toimivat sekä vaihtosähköpiireissä että tasasähköpiireissä. Sulakevalmistajat ovat kehittäneet vaativampiin tasasähkösovelluksiin erityisiä DC-sulakkeita. Kuitenkin AC-sulakkeen käyttö on mahdollista, jos esimerkiksi aikavakio on pieni ja sulakevalmistaja tarjoaa tarvittavat korjauskäyrästöt sulakkeen mitoittamiseen tasasähköpiiriin. [7]

Sulaketta voidaan käyttää ainoana suojana tai koordinoitusti esimerkiksi kontaktorin kanssa. Käyttötarkoituksesta riippuen se voi suojata komponentit, eli täyttää 1. kohdan vaatimuksen, tai toimia vain katastrofisuojauksena. Tällöin sulake estää kaapelien sulamisen ja komponenttien mahdollisesta tuhoutumisesta ympäristölle aiheutuvat vahingot sekä eristää vikapisteen muusta piiristä. [5] [8]

Suojattavan piirin mahdollisten erityisvaatimusten lisäksi tasasähköpiirin sulakesuojauksen toiminnan kannalta kriittiset seikat ovat [7] [11]:

- Oikosulkupiirien aikavakiot
- Induktansseihin varastoitunut energia
- Suurin sulakkeen yli esiintyvä jännite
- Vikavirtojen suuruudet
- Piirin nimellisvirta
- Äärellisen energiavaraston tapauksessa, oikosulkua syöttävän lähteen energian määrä ja varaustila

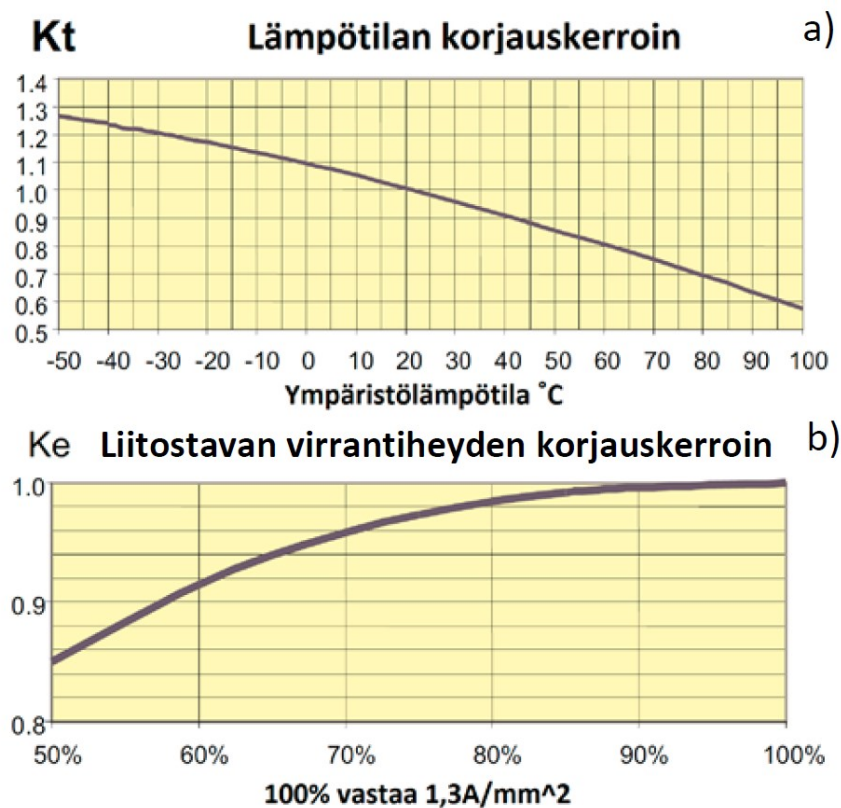
Mahdollisten oikosulkupiirien aikavakioiden määrittämisen jälkeen, sulakkeen sulamisaikaa voidaan tutkia yhtälön (6) ja sulakevalmistajan tarjoamien sulamiskäyrästäjien avulla. Sulamisaika voidaan määrittää käyrien leikkauspisteessä piirtämällä sulakevalmistajan tarjoamaan kuvan 10 kaltaiseen sulamiskäyrään yhtälön (6) avulla laskettu oikosulkuvirran liukuva tehollisarvo. [6] [9]

Sulamisen jälkeen alkavan valokaariajan keston ja sulakkeen läpäisemän virran suuruuden määrittäminen on tasasähköpiirissä hankalaa. Kun sulakkeita käytetään vaihtosähköpiirissä, valmistajat tarjoavat käyrästäjien, jonka avulla voidaan määrittää oikosulkuvirran suurimman arvon riippuvuus prospektiivisen oikosulkuvirran tehollisarvosta. Kyseistä käyrää ei kuitenkaan ole mahdollista käyttää tasasähköpiirien tapauksessa. Sulakevalmistajalta on mahdollista saada kyseinen tieto. [9]

Sulakevalmistajat tarjoavat erilaisia korjauskäyrästäjiä ja -kaavoja sulakkeiden jännite- ja virtakestoisuuden mitoittamiseen testiympäristöstä poikkeaviin olosuhteisiin. Erilaisten korjauskertoimien avulla varmistetaan sulakevalmistajan lupaaman käyttöiän lisäksi sulakkeen toimivuus normaali- ja vikatilanteissa. Kuvan 14 mukaisen piirin aikavakiosta johtuvan jännitteenkorjauskäyrästäjän lisäksi valmistajat tarjoavat sulakkeen maksimivirtakestoisuuden määrittämiseksi yleensä

korjauskäyrästöt ympäristölämpötilalle, liitostavalle, jäähdytysilman nopeudelle ja kuormavirran taajuudelle.

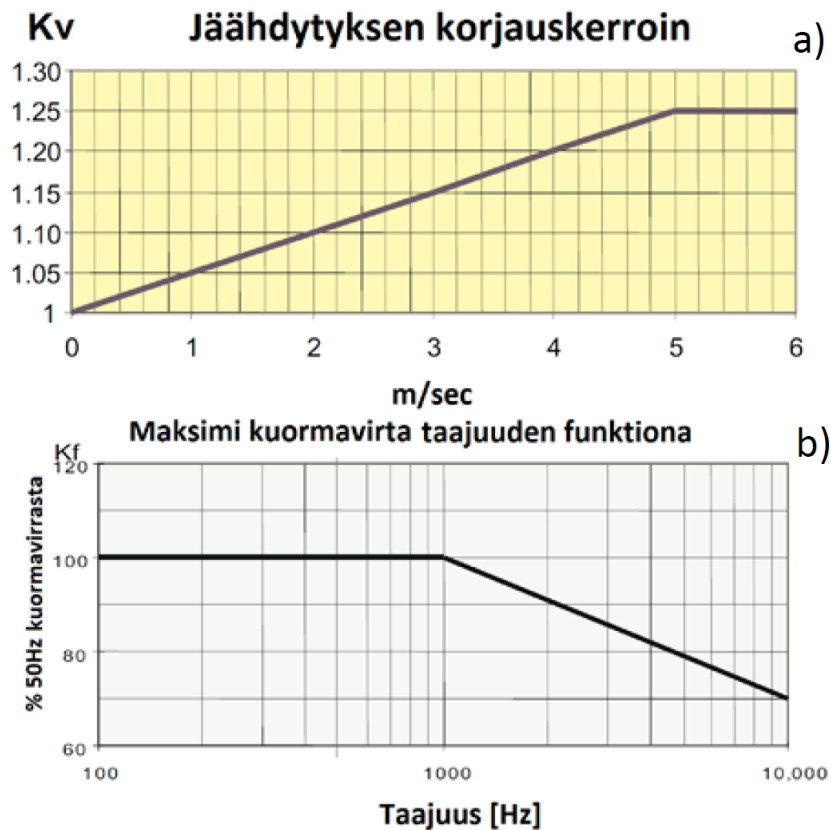
Kuvissa 15 ja 16 on esitetty sulakevalmistaja Bussmannin korjauskäyrästöjä nopeiden sulakkeiden virtakestoisuuden mitoittamiseen. Kuvassa 15 on esitetty käyrästöt korjauskertoimien määrittämiseksi erilaisille ympäristölämpötiloille ja sulakkeeseen liitettävien kaapeleiden tai kiskojen poikkipinta-aloille. Kuvasta 15 a) nähdään, että 20 °C suuremmat lämpötilat pienentävät sulakkeen virtakestoisuutta, kun taas alle 20 °C lämpötilat kasvattavat virtakestoisuutta. Liitostavan virrantiheyden tulee noudatella IEC 60269-standardin osan 4 mukaista 1,3 A/mm²- ehtoa tai sulakkeen virtakestoisuutta on pienennettävä kuvan 15 b) mukaisesti [6]. Sulakkeen sijoittaminen koteloon poikkeaa ilmankierrotaan luokituslaitoksien mittausolosuhteista, joten liitostavan virrantiheyden korjauskertoimeen K_e tulee lisätä ylimääräinen korjauskerroin. Yleensä tälle käytetään arvoa 0,8. [6]



Kuva 15. Esimerkkikäyrästöt ympäristölämpötilan ja liitostavan virrantiheyden korjauskertoimien määrittämiseksi [6])

Kuvassa 16 on esitetty käyrästöt korjauskertoimien määrittämiseen eri jäähdytysilman nopeudelle ja kuormavirran taajuudelle. Kuten kuvasta nähdään, jäähdytysilman virtausnopeutta kasvattamalla voidaan sulakkeen virtakestoisuutta kasvattaa. Käytettäessä nestejäähdytystä korjauskerroin on saatavissa sulakevalmistajalta pyydyttäessä. Kuvasta 16 b) nähdään, että kuormavirran taajuuden ylittäessä 1 kHz

sulakkeen virtakestoisuutta täytyy pienentää sulake-elementin häviöiden kasvaessa virranahdon ja lähivaikutuksen takia. [6]



Kuva 16. Esimerkkikäyrästöt jäähdytyksen- ja kuormavirran taajuuden korjauskertoimien määrittämiseksi (mukailtu lähteestä [6])

Kun sulakkeen käyttöolosuhteet on määritetty ja korjauskertoimien suuruudet määritetty kuvien 15 ja 16 kaltaisista käyrästöistä, yhtälön (9) avulla voidaan laskea sulakkeen kestävä jatkuva virran tehollisarvo kyseisessä sovelluksessa.

$$I_b = I_n \cdot K_t \cdot K_e \cdot K_v \cdot K_f \quad (9)$$

jossa

- I_b on sulakkeen kestävä jatkuva virran tehollisarvo
- I_n on valmistajan sulakkeelle ilmoittama nimellisvirran tehollisarvo
- K_t on ympäristölämpötilan korjauskerroin
- K_e on liitostavan virrantiheyden korjauskerroin
- K_v on jäähdytyksen korjauskerroin
- K_f on virran taajuuden korjauskerroin

Jos piirissä esiintyy lisäksi jaksollista kuormitusta ja ylikuormia, sulakevalmistajat tarjoavat lisäkäyrästöjä ja taulukoita, joiden avulla valmistajan ilmoittama sulakkeen

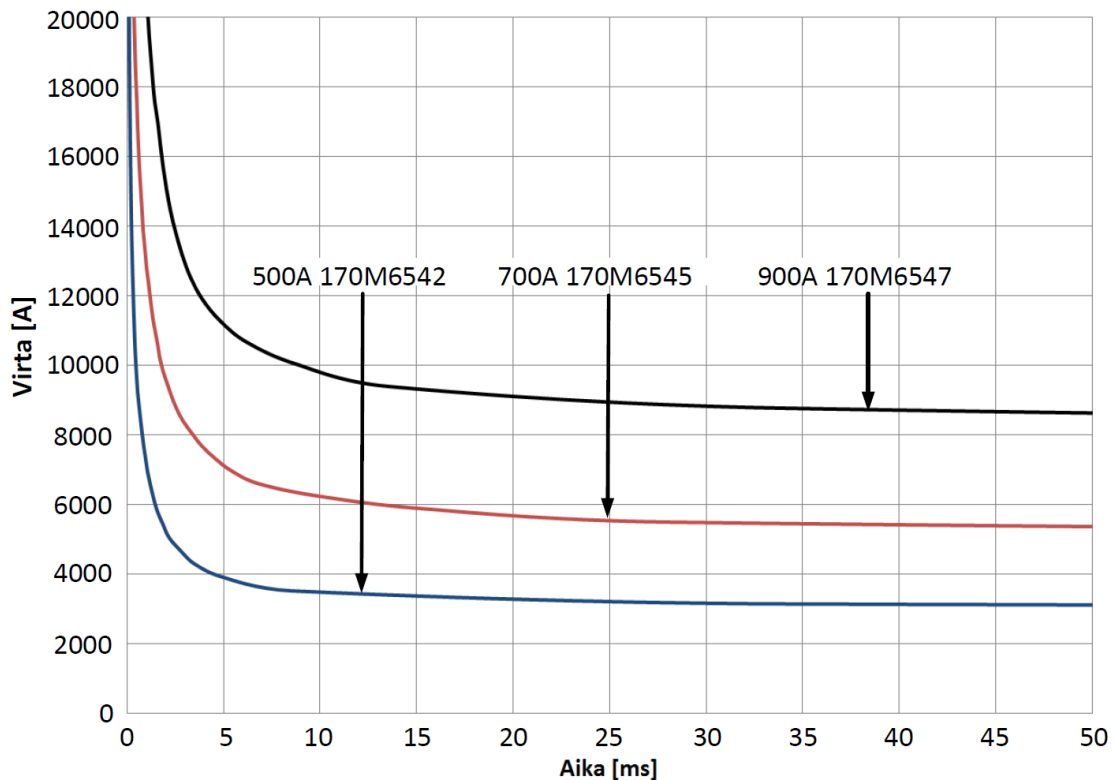
elinikä voidaan varmistaa. Näin vältetään sulakkeen ennenaikaiselta toiminnalta ja siitä johtuvalta laitteen käyttökeskeytykseltä.

Sulake-elementin vanhentuminen on seurausta termisestä rasituksesta eli elementin lämpölaajenemisesta ja -supistumisesta. Elementtiin kohdistuva rasitus on sitä suurempi, mitä suurempi lämpötilan muutos (ΔT) sulake-elementissä tapahtuu lämpösyklin aikana. Sulakkeen herkkyys sykliselle rasitukselle ja ylikuormille vaihtelee sulaketyypin mukaan. Nopeasti toimivan puolijohdesulakkeen ohuet kaulat sulavat, muuttavat muotoaan ja vanhenevat herkemmin kuin hitaammin toimivan sulakkeen. Syklisyystekijä tulee lisätä yhtälöön (9) uutena korjauskertoimenä. [8] [10]

Erikoisempia ja monimutkaisempia esimerkiksi hybridityökoneiden ajoprofileja ei välttämättä löydy sulakevalmistajien esimerkkisykleistä. Siinä tapauksessa sulakkeen vanheneminen on mahdollista määrittää Manson-Coffinin-lain avulla. Se antaa arvion sulakkeen eliniälle syklien lukumääränä kyseisellä ajoprofililla. Menetelmän käyttö vaatii tietoja sulakkeen muutoslämpövastuksesta ja mekaanisista ominaisuuksista. Kyseiset parametrit täytyy käytännössä pyytää sulakevalmistajalta tai käyttää sulakevalmistajan tarjoamaa laskentaohjelmistoa. [10]

Hybridiajoneuvoissa tilavaatimukset sekä haastavat että nopeasti muuttuvat ympäristöolosuhteet (ajoneuvon on esimerkiksi kyettävä toimimaan kylmässä ulkoilmassa ja lämpimässä kaivostunnelissa) johtavat tiiviisiin laitekoteloihin ja vesijäähdytyksen hyödyntämiseen komponenttien hukkalämmön poistossa. Puhaltimien ja vapaan ilmankierron puuttuessa ympäristölämpötila kohoaa ajoneuvokäytöissä korkeammaksi kuin teollisuuskäytöissä. Ajoneuvokäyttöön tarkoitettujen komponenttien käyttölämpötila-alueet voivat vaihdella esimerkiksi -40 °C – 120 °C välillä.

Kuten kuvan 15 a) käyrästä nähdään, esimerkiksi 80 °C ympäristölämpötilassa lämpötilankorjauskertoimen arvoksi tulee 0,7 ja yhdessä sulakkeen laatikkoon sijoittamisen kanssa korjauskertoimen arvoksi tulee 0,56. Liitteessä A on esitetty esimerkki sulakkeen virran mitoituksesta sykliseen ajoneuvokäyttöön. Käytön syklisyydestä riippuen esimerkiksi 500 A tasasähkökatkojan pääsulakkeen koko voi kasvaa 700 A–900 A. Kuvassa 17 on esitetty vertailu Bussmannin valmistaman nopean aR-luokan 170M65**-tyyppisen sulakkeen sulamiskäyristä eri nimellisvirroilla. Kuten kuvasta nähdään, sulakekoon kasvu vaikuttaa merkittävästi valokaariajan käynnistämiseen vaadittavaan virtaan ja aikaan.



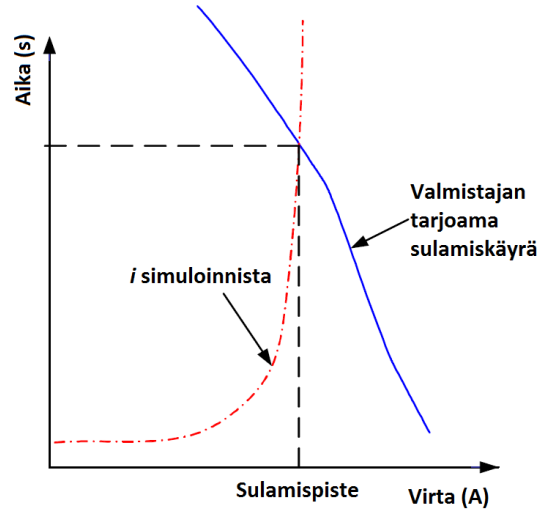
Kuva 17. Bussmannin 170M65**-tyyppisten 500 A, 700 A ja 900 A sulakkeiden sulamiskäyrät ajan funktiona

4.4 Sulakkeen simulointimalli

Sulakkeen piirisimulaattorimalli voidaan jakaa kahteen osaan: sulamis- ja valokaarimalliin. Sulamisvaiheen mallintaminen onnistuu helposti sulakevalmistajan tarjoamien datalehtitietojen perusteella. Ennalta määritellyn virta-arvon ylittyessä, eli piiriin siirryessä epänormaalin toimintapisteeseen kuten oikosulkuun, piirisimulaattori alkaa laskea virran liukuvaa tehollisarvoa tai integroida virtaa I^2t -arvon selvittämiseksi. Sulamisen päättymishetken määrittämiseksi laskettua arvoa verrataan valmistajan sulamiskäyrään tai sulamisen I^2t -arvoon. Kuvassa 18 on esitetty sulamispisteen määrittämisen periaate. Käytettäessä valmistajan ilmoittamaa sulamisen I^2t -arvoa, on otettava huomioon, että se kuvaa sulamisaikaa tarkasti vain nopeilla sulamisajoilla (noin < 20 ms [12]). Haluttaessa mallintaa hitaampia sulamisaikoja on käytettävä edellä esitettyä virran tehollisarvoon ja sulamiskäyrään perustuvaa tekniikkaa. [12] [13]

Piiriin sisältäessä induktanssia ja haluttaessa mallintaa nopeita toiminta-aikoja pelkän sulamismallin käyttäminen ei anna tarkkaa ratkaisua. Sulakkeen simulointimalliin on myös sisällytettävä valokaariaikaa kuvaava malli.

Valokaaren käyttäytymisen mallinnuksessa ongelmana on sen epälineaarisuus ja riippuvuus ympäröivästä piiristä. [12]



Kuva 18. Sulamispisteen määrittäminen (mukailtu lähteestä [12])

Piirisimulaattoriin käyttökelpoisin valokaarimalli on esitelty lähteessä [12]. Malli pyrkii kuvaamaan yhtälössä (3) olevaa sulakkeen jännitettä $u_a(t)$ kuvan 8 mukaisessa tilanteessa. Sulakkeen yli oleva jännite valokaariaikana riippuu virran suuruudesta, valokaaren pituudesta ja sarjaan syttyneiden valokaarien lukumäärästä. Sulakkeen jännitteelle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$u_a(t) = [u_{AK}(i) + e(i)l(t)] n_r \quad (10)$$

jossa $u_a(t)$ on sulakkeen jännitteen hetkellisarvo valokaarien palaessa
 $u_{AK}(i)$ on katodin yli oleva jännitehäviö
 $e(i)$ on sähkökentän voimakkuus
 $l(t)$ on valokaaren pituus
 n_r on sulake-elementissä sarjassa olevien kaulojen lukumäärä

Kuten yhtälöstä (10) nähdään, se sisältää tuntemattomia suureita. Katodin yli oleva jännitehäviö $u_{AK}(i)$ voidaan määrittää kokeellisesti saadusta yhtälöstä

$$u_{AK}(i) = U_0 + Ri^x \quad (11)$$

jossa i on virta

$$U_0 = 15 \text{ V}$$

$$R = 1 \Omega$$

$$x = 0,3$$

Valokaaren pituus $l(t)$ voidaan määrittää kokeellisesta yhtälöstä

$$l(t) = l_0 + \int_{T_{m0}}^t \frac{0,46 + 0,0219 \cdot i^{0,6}}{A(l(t))} dt \quad (12)$$

jossa l_0 on valokaaren pituus alussa

T_{m0} on valokaariajan alkamishetki

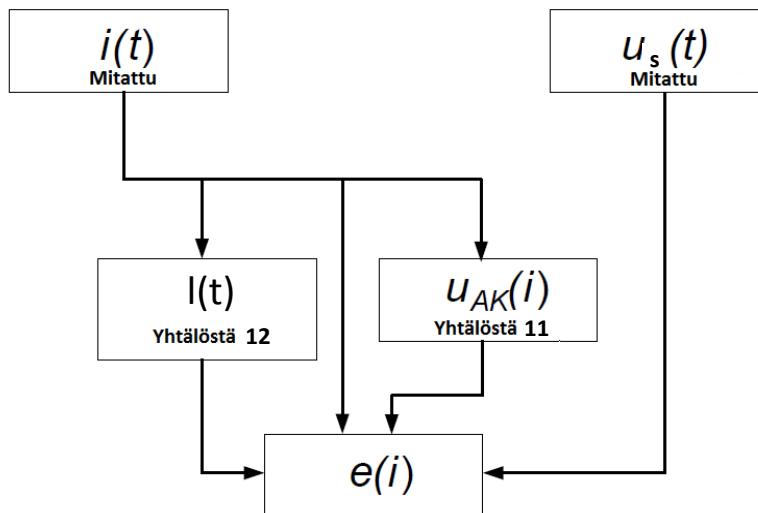
$A(l(t))$ on valokaaren sulattaman sulake-elementin pinta-ala ajanhetkellä t

Yhtälön (12) käyttö vaatii rekursiivista laskentaa ja pinta-alafunktio $A(l(t))$ on pyydettävä sulakevalmistajalta. Se on yksilöllinen jokaiselle sulaketyypille. [12]

Sähkökentän voimakkuus $e(i)$ voidaan ratkaista yhtälöstä (10)

$$e(i) = \frac{1}{l(t)} \left(\frac{u_s(t)}{n_r} - u_{AK}(i) \right) \quad (13)$$

Yhtälön ratkaiseminen vaatii sulakkeen toiminnan mittaamista valokaaren aikana. Sulakkeessa sarjassa olevien kaulojen lukumäärä n_r voidaan pyytää sulakevalmistajalta. Kuvassa 19 on esitetty lohkokaavio sähkökentän voimakkuuden ratkaisemiseksi. Kuten kuvasta nähdään, sulakkeesta mitataan virta ja jännite, jonka jälkeen mittaustietoja hyödynnetään yhtälöissä (11) ja (12). Näiden avulla saadaan laskettua loput yhtälön (13) tuntemattomista termeistä $l(t)$ ja $u_{AK}(i)$.



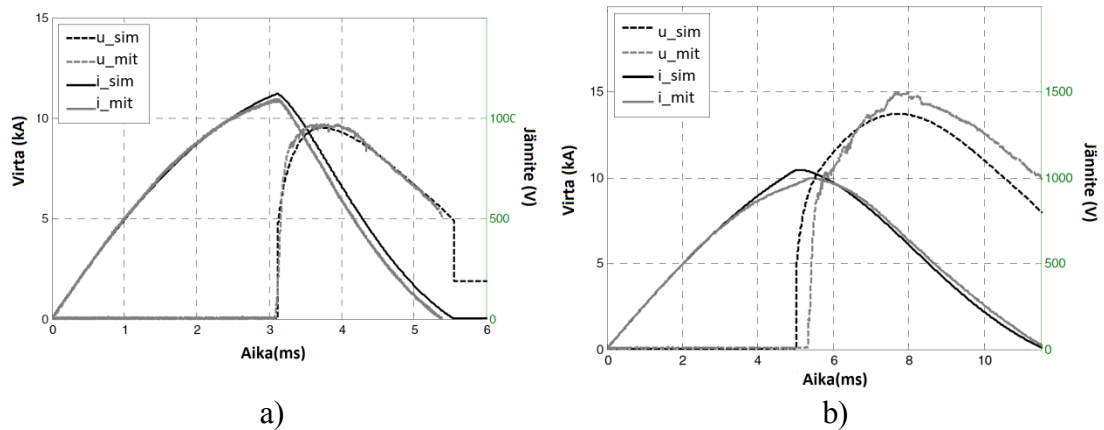
Kuva 19. Lohkokaavio sähkökentän voimakkuuden määrittämiseen.

Kuten yhtälöstä (10) nähdään, kerroin n_r olettaa kaikkien valokaarien syttyvän palamaan sarjassa oikosulkutilanteessa. Lisäksi malli ei ota huomioon

ympäristölämpötilan vaikutusta, eikä lämmön vaihtoa ympäristön kanssa sulamis- ja valokaariaikana. Eritelty malli sopiikin vain suurille oikosulkuvirroille, jolloin elementin lämpeneminen tapahtuu niin nopeasti, että se on lähes adiabaattista.

Kuvassa 20 on esitetty simulointimallin vertailu todellisiin mittaustuloksiin kuvan 8 mukaisessa piirissä. Mittaustulokset vastaavat hyvin kuvassa 9 esiteltyjä sulakkeen teoreettisia virran ja jännitteen käyrämuotoja.

Kuvan 20 a) mukaista tulosta on käytetty mallin parametrisoinnissa. Siinä aikavakion arvo $\tau \approx 2,5$ ms. B)-kohdassa esitetty mittaustulos on suoritettu aikavakiolla $\tau \approx 5$ ms. Tuloksessa on havaittavissa pientä epätarkkuutta sulamispisteen määrittämisessä. Simulointimalli kuvaa kuitenkin hyvin sulakkeen huippujännitteen ja kokonaistoiminta-ajan, joka tasasähköpiireissä on muuten hankala määrittää. Yhdistelemällä piirisimulaattorin muita ominaisuuksia ovat esimerkiksi lämpösimuloinnit ja systeemitason tarkastelu mahdollisia mallin nopeasta laskenta-algoritmistä johtuen. Artikkelissa ei ole suoritettu testejä suuremmilla aikavakioilla, mutta parantamalla sulamishetken määrittystä malli yltänee 20 ms sulamisaikoihin [12].

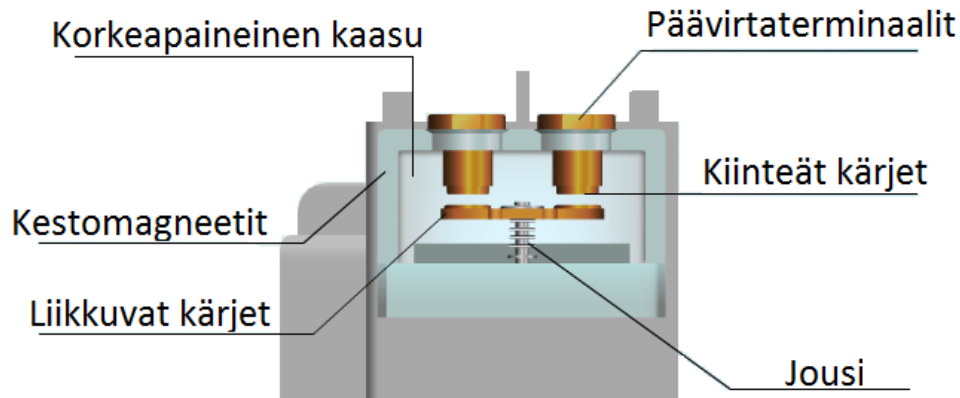


Kuva 20. Sulakkeen simulointimallin ja mittaustulosten vertailu a) parametrisoinnissa käytetyllä piirillä jossa aikavakio on noin 2,5 ms b) aikavakiolla 5 ms [12]

4.5 DC-kontaktorin rakenne ja toimintaperiaate

Kuvassa 21 on esitetty DC-kontaktorin rakenne. Kontaktori on kytkin, jolla suuria virtoja ja jännitteitä voidaan ohjata pienellä ohjausvirralla. Sen päävirtaa johtavia osia kutsutaan kärjiksi. Kiinteisiin kärkiin on yhdistetty päävirtaterminaalit, joihin kaapelit tai kiskot kytketään. Liikkuvia kärkiä ohjataan kontaktorissa olevalla kelalla ja jousella. Kun kelaan johdetaan virta, se toimii sähkömagneettina, joka kontaktorin

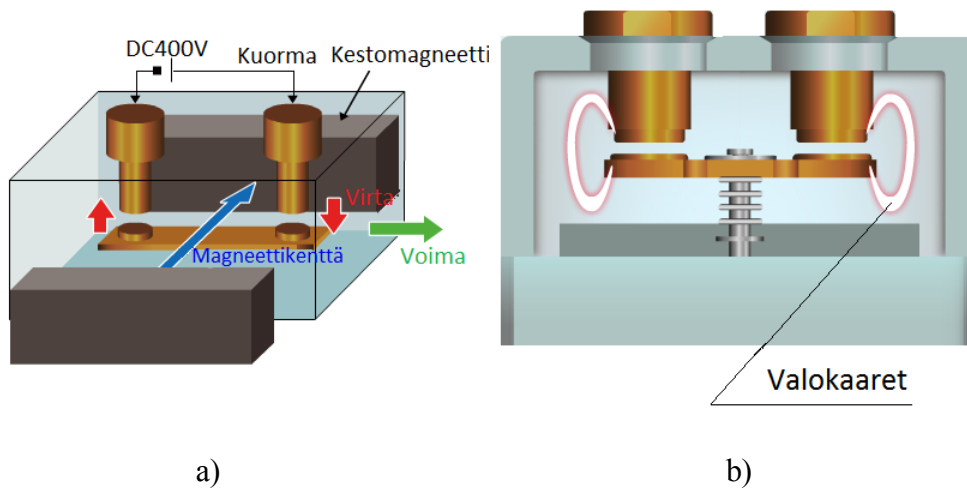
rakenteesta riippuen vetää liikkuvat kärjet kiinni tai auki kiinteistä kärjistä. Virran katketessa kelalta jousi vetää liikkuvat kärjet vastakkaiseen asentoon. [14] [15]



Kuva 21. Tyypillinen DC-kontaktorin rakenne (mukailtu lähteestä [15])

Koska todellisissa sähköpiireissä esiintyy aina jonkin verran induktanssia, virta ei voi katketa äkisti kontaktorin avautuvien kärkien yli. Piirin induktanssi pyrkii vastustamaan nopeasti katkeavaa virtaa nostamalla jännitettä virran katkeamisnopeuteen verrannollisena. Tästä seuraa valokaarien syttyminen kärkien välille kontaktorissa olevan kaasun läpilyöntilujuuden ylittyessä. Toisin kuin vaihtosähkö, tasavirta ei sisällä luonnollisia nollakohtia, joten DC-kontaktorin on kyettävä sammuttamaan syttyvät valokaaret ja pakottamaan katkaistavan piirin virta nolleen. [14]

Kuvassa 22 a) on esitetty DC-kontaktoreissa yleisesti käytetty valokaarien sammutusmekanismi. Se koostuu kärkien vastakkaisille puolille asetetuista kestmagneeteista ja korkeapaineisesta hyvin lämpöä johtavasta kaasusta. Magneettikentän vaikutuksesta valokaaret leviävät kärjistä poispäin kuvan 22 b) esittämällä tavalla. Valokaarien pidentyessä niiden resistanssi kasvaa, mikä pakottaa katkaistavan piirin virran nopeammin kohden nolaa ja mahdollistaa valokaarien sammutuksen. Kaasu siirtää lämpöä pois kärjiltä, mikä helpottaa valokaarien sammutusta. [14] [15]



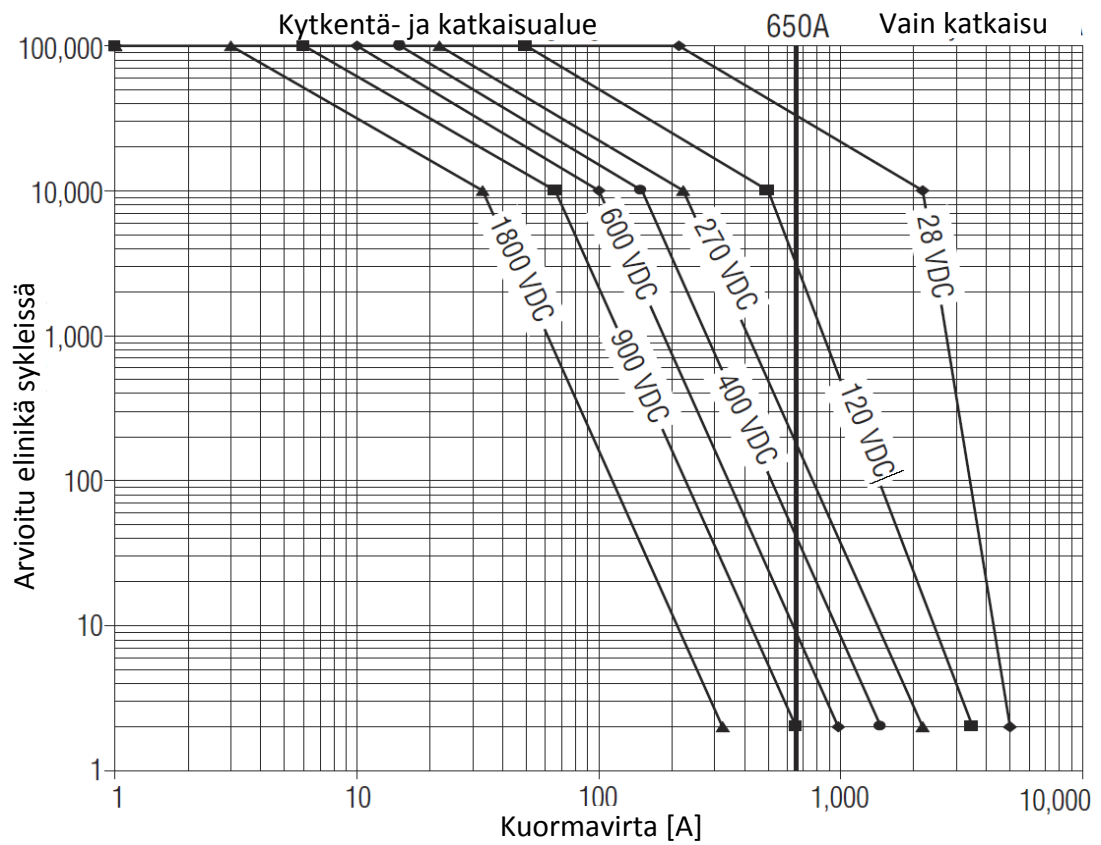
Kuva 22. DC-kontaktorin toiminta virran katkaisussa (mukailtu lähteestä [15])

Valokaaret kuluttavat kontaktorin kärkiä ja lyhentävät niiden elinikää. Valmistajat tarjoavat datalehtitiedoissaan kuvan 23 mukaisia käyriä. Niistä on mahdollista määrittää kontaktorin elinikä syklien lukumääränä tietyillä virran ja jännitteen arvoilla. [16] Oikosulku- ja ylivirtasuojauksen kannalta mielenkiintoisimpia suureita ovat käyrän määrittämisessä käytetyt testiolosuhteet, eli jännite, katkaistava virta sekä testipiirin induktanssi ja resistanssi.

Kuten kuvasta 23 nähdään, suojattavan piirin nimellisjännitteen kasvaessa myös kontaktorin virran katkaisukykyä on pienennettävä. Haastattelujen perusteella kontaktorin toiminta todellisessa piirissä on syytä testata eikä datalehtitietoja voi pitää täysin luotettavan. Eräs valmistaja myös suosittelee kontaktorin katkaisukyvyyn varmistamista suojattavassa piirissä, koska se voi poiketa valmistajan käyttämästä testipiiristä.

Tyco Electronicsin valmistamaa EV200-pääkontaktoria käytetään yleisesti sähköajoneuvosovelluksissa. Valmistaja määrittelee tyypillisen sähköajoneuvosovelluksen 320 V DC-jännitteelliseksi. Kyseisellä jännitteellä katkaistava maksimivirta on 2000 A testipiirissä, joka resistanssin lisäksi sisältää 25 μH induktanssia. Valmistaja on myös testannut kontaktorin katkaisukyvyyn 2500 A ja 200 μH testipiirillä. Kyseiset virrat kontaktori pystyy katkaisemaan kerran, jonka jälkeen sen eristysvastus on kärsinyt liikaa. [17]

Haastatteluiden perusteella raskaiden hybridityökoneiden tyypillinen välipiirin jännite voi olla esimerkiksi 700 V ja akkupaketin 600 V. Puolisiltakatkojan kuristinpaketin koko voi olla esimerkiksi 100 μH vaihetta kohden. Kuvasta 23 nähdään, että kontaktorin katkaisukyky jää pieneksi, jos esimerkiksi käytön nimellisvirta on 500 A. Markkinoilta löytyvien ajoneuvokäyttöön tarkoitettujen kontaktorien virrat ja jännitteet soveltuvat parhaiten hybridihenkilöautoissa käytettävien virtojen ja jännitteiden katkaisuun.



Kuva 23. Sähköajoneuvoissa tyypillisesti käytettävän Tyco Electronicsin valmistaman EV200-pääkontaktorin kytkeä- ja katkaisusykliä virran funktiona eri jännitteen arvoilla [17]

5 Litiumioniakku

Akkukkenno on sähkökemiallinen komponentti, joka purkutilanteessa muuntaa kemiallista energiaa sähköenergiaksi ja ladattaessa sähköenergiaa kemialliseksi energiaksi. Sen tarkoituksena on toimia uudelleenladattavana ja helposti liikuteltavana energiavarastona. Tässä luvussa esitellään litiumioniakun ominaisuuksia ja sen oikosulkusuojaukseen liittyviä seikkoja. Kohdassa 5.1 käydään läpi akkuihin liittyviä käsitteitä sekä litiumioniakun rakennetta ja käyttöä. Kohdassa 5.2 esitellään litiumioniakulle kehitettyjä simulointimalleja ja tutkitaan mahdollisuutta hyödyntää malleja oikosulkusimuloinneissa. Tämän jälkeen kohdassa 5.3 esitellään litiumioniakun turvallisuuteen liittyviä standardeja. Lisäksi esitellään ja tutustutaan yleisesti käytössä olevan oikosulku- ja ylivirtasuojausratkaisun ongelmiin.

5.1 Akkujen peruskäsitteitä

Yksittäisen akkukennon jännite on tyypillisesti 1 V–6 V ja kapasiteetti on suhteellisen pieni. Liikennevälinekäytöissä tarvitaan sekä suurempaa jännitettä että kapasiteettia, joten akkukennoja täytyy kytkeä sarjaan ja rinnan halutun suuruisen jännitteen ja kapasiteetin saavuttamiseksi. Tällaista useamman kennon muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan akkumoduuliksi. Akkupaketiksi voidaan kutsua useamman moduulin muodostamaa kokonaisuutta, johon on kytketty erilaisia akuston hallintaan ja suojaukseen tarkoitettuja piirejä. [18] [19]

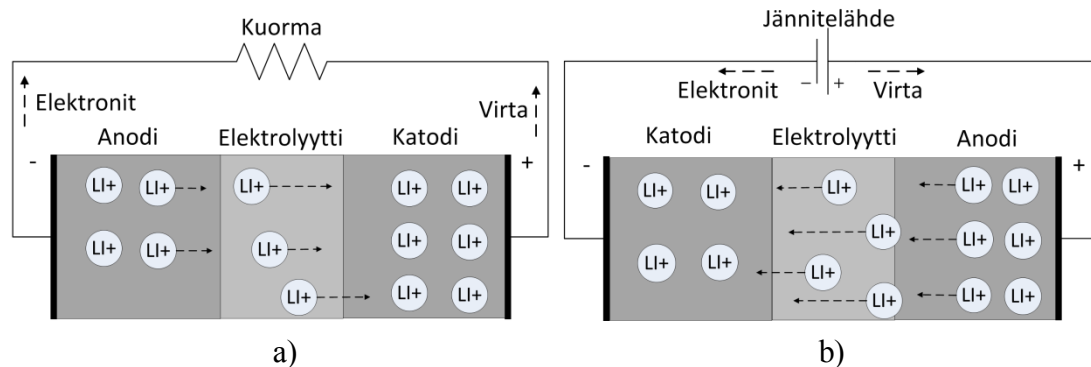
Liikennevälinekäytön kannalta akun tärkeimmät ominaisuudet ovat hinta, turvallisuus sekä energia- (Wh/kg tai Wh/l) ja tehotiheys (W/kg tai W/l). Energiatiheys määrittää ajoneuvon ajomatkan ja tehotiheys osaltaan esimerkiksi ajoneuvon kiihtyvyyden. Ajoneuvokäytössä suuri energia- ja tehotiheys ovat toivottavia, mutta ongelmana on, että ne ovat jokseenkin toisensa poissulkevia suureita. Tämän perusteella akut voidaan jaotella kahteen kategoriaan: tehoakkuihin ja energia-akkuihin. Jos akkua halutaan purkaa tai ladata suurella teholla, sen sisäisistä johdotuksista täytyy tehdä paksuja häviöiden minimoimiseksi. Tämä vie tilaa energian varastoitumiseen tarkoitetulta materiaalilta ja siten laskee energiatiheyttä verrattuna saman tilavuuden omaavaan energia optimoituun akkuun. [20]

5.1.1 Litiumioniakun rakenne ja toimintaperiaate

Akkujen yleinen toimintaperiaate pohjautuu akkukennon eri osien välisiin hapetus-pelkistysreaktioihin. Akkukkenno koostuu anodista, katodista ja niiden välissä sijaitsevasta elektrolyytistä. Sähkökemiassa anodi on määritelty elektrodina, jolla hapettuminen tapahtuu ja katodi elektrodina, jolla tapahtuu pelkistyminen. Erilaisia

elektrolyyttejä sekä anodi- että katodimateriaaleja on olemassa useita. Liikennevälinekäyttöjen kannalta lupaavimmat akkuteknologiat pohjautuvat litiumiin sen parhaan energiatihedyyden takia. [18] [21]

Litiumioniakkukennon toimintaperiaate sen purkautuessa ja latautuessa on esitetty kuvassa 24. Kuten kuvasta nähdään, yhdistettäessä akun elektrodit kuormaan anodilla alkaa tapahtua hapetusreaktio, jossa anodimateriaalissa olevat litium-atomit luovuttavat elektroneja anodiin kiinnitetylle virrankeräyslevylle. Elektronit kiertävät johtimien ja kuorman kautta katodin virrankeräyslevylle. Virtapiiri sulkeutuu, kun anodin hapetusreaktiossa litium-atomit ovat muuttuneet positiivisiksi litiumioneiksi ja vaeltavat elektrolyytin läpi. Ionien saavuttaessa huokoisen katodimateriaalin siinä tapahtuu pelkistymisreaktio, jossa ionit vastaanottavat elektronin ja asettuvat katodimateriaalin väleihin. Akkukennon latautuessa hapetus-pelkistysreaktiot tapahtuvat käänteisesti, joten anodi- ja katodielektrodit vaihtavat paikkaa. [21] [22]



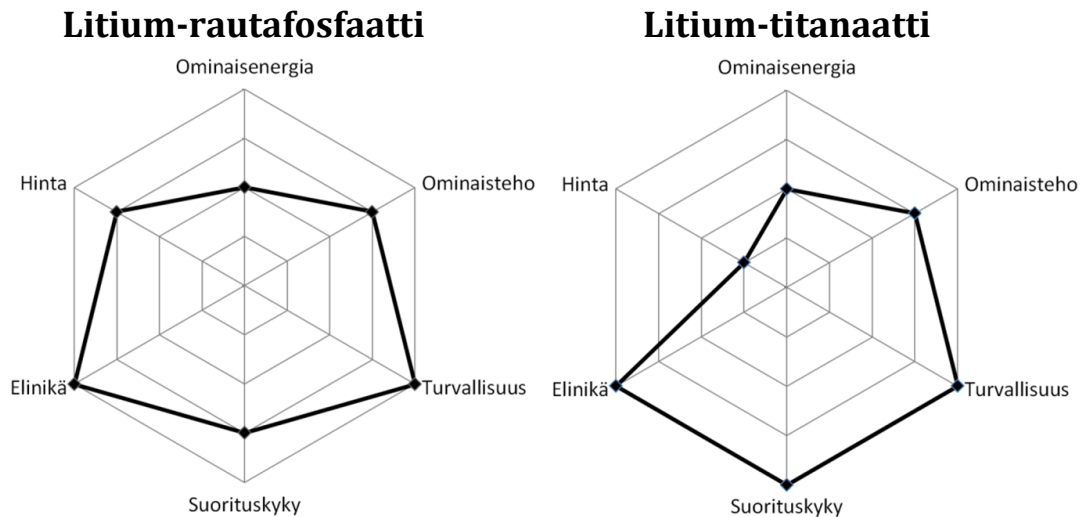
Kuva 24. Litiumioniakun sähkökemiallinen toiminta a) purkutilanteessa b) lataustilanteessa. (mukailtu lähteestä [21])

Erilaisia litium-ioni akkukemioita on olemassa useita. Ne on yleensä nimetty katodimateriaalin koostumuksen perusteella. Anodimateriaalina käytetään yleisesti grafiittia. Liikennevälinekäytöissä potentiaalisin ja nopeimmin yleistynyt akkukemia on litium-rautafosfaatti eli LiFePO_4 -akku tai LFP. Toinen liikennevälinekäyttöihin hyvin soveltuva akkukemia on litium-titanaatti, eli $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ -akku tai LTO. Siinä anodimateriaalina käytetään litium-titanaattia grafiitin sijasta. [20] [21]

Litiumionikennon lämpötilan kasvaessa liikaa, useimmilla akkukemioilla on vaarana joutua ns. termiseen karkaukseen (Thermal runaway). Siinä kennon lämpötila lähtee kasvamaan hallitsemattomasti tuhoisin seurauksin. LFP- ja LTO-kemioiden yhdistävänä tekijänä on niiden stabiilisuus ja teoreettinen immunitetti termiselle karkaamiselle. Turvallisuuden kannalta ne ovat siis parhaimpia ajoneuvokäyttöön.

Kuvassa 25 on esitetty eri kemioiden vertailussa käytetyt mittarit sekä LFP- ja LTO-akkujen vertailu. Kuten kuvasta nähdään, akkujen vertailussa on hyödynnettävä useita mittareita, eikä esimerkiksi suurimman ominaisenergian omaavan akkutyyppin voida sanoa olevan yksiselitteisesti paras. Kuvasta 25 voidaan myös havaita, että LFP- ja LTO-akkujen ominaisuudet ovat muuten samat, mutta LTO-akun suorituskyky on

parempi. Suorituskyky tarkoittaa akun lataus- ja purkuominaisuuksia kuumissa ja kylmissä käyttöolosuhteissa. Tämä tulee ilmi esimerkiksi mahdollisuutena ladata LTO-akkua alhaisissa lämpötiloissa. LTO-akun hinta on kuitenkin vielä korkeampi kuin LFP-akun. [18] [20] [21]



Kuva 25. Litium-rauta-fosfaatin ja Litium-titanaatin ominaisuuksien vertailu, suurempi arvo parempi. (mukailtu lähteestä [21])

Neljä käytössä olevaa kennotyyppiä on esitetty kuvassa 26. Kuvan kaksi vasemmanpuoleista kennoa ovat pieni 18650 (18 mmx650 mm)-sylinteri ja iso 26650 (26 mmx650 mm)-sylinteri. Kuvan kaksi oikeanpuoleista kennoa ovat suuntaissärmiö- ja pussikenno.



Kuva 26. Neljä käytössä olevaa kennotyyppiä. Kaksi vasemmanpuoleista: pieni 18650-sylinteri ja iso 26650-sylinteri sekä kaksi oikeanpuoleista: suuntaissärmiö- ja pussikenno. [18]

Koska kennoista kootaan isompia akkupaketteja, kennojen geometria ja niiden välillä tarvittavien kytkentöjen määrä vaikuttavat akkupaketin energia- ja tehottiheyteen. Esimerkiksi sylinterinmuotoisista kennoista koottu akkupaketti häviää suuntaissärmiön muotoisista kennoista kootulle akkupaketille pakkaustiheydessä.

Muita kennotyyppien välisiä eroja ovat esimerkiksi akkupaketin kennojen uusimisen helppous ja soveltuvuus erilaisiin käyttökohteisiin. [18] [20]

5.1.2 Litiumioniakun käyttö

Litium-ioni kennojen turvallisen toiminta-alueen, SOA (Safe Operating Area), rajaavat virta, lämpötila ja jännite. Lähdejännite, OCV (Open Circuit Voltage), tarkoittaa kennon jännitettä kuormittamattoman ja napajännite kuormitetun kennon navoista mitattua jännitettä.

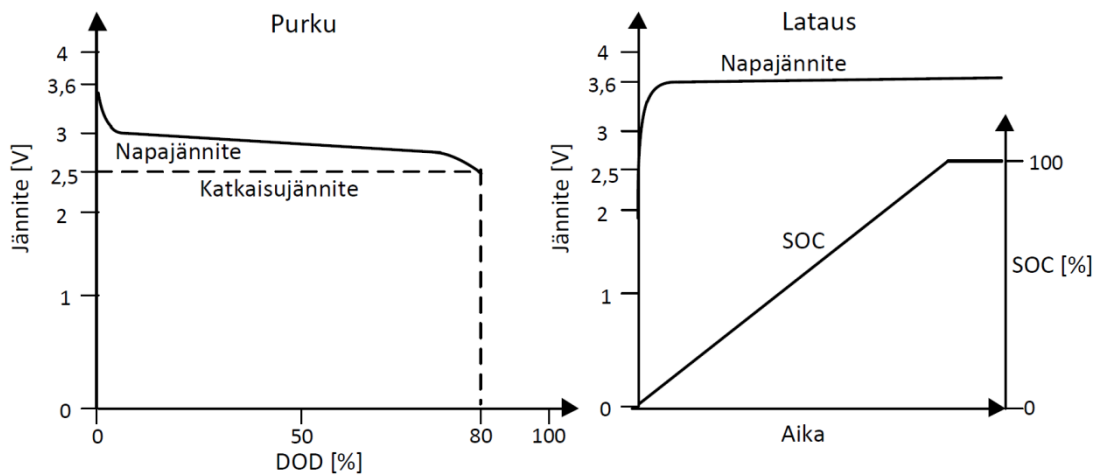
Akun varaustila prosenteissa maksimista, SOC (State Of Charge), määritellään yhtälöllä

$$SOC [\%] = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (13)$$

jossa Q_1 on akun varaustila täytenä
 Q_2 on akusta purkautunut varaus

Varaustila Q_1 voidaan määrittää esimerkiksi akkuvalmistajan datalehtitiedoista, tosin esimerkiksi akun ikääntyessä kapasiteetti pienenee. Akusta purkautunut tai siihen ladattu varaus määritetään yleensä integroimalla mitattua virtaa. Akulle voidaan määritellä myös purkausaste, DOD (Depth Of Discharge), joka kuvaa kuinka suuri osa akun kapasiteetista on käytetty prosenteissa. [19]

Kuvassa 27 on esitetty litiumioniakun jännitteen tyypillinen käyrämuoto lataus- ja purkutilanteessa. Kuten kuvasta nähdään, kennon jännite laskee purettaessa ja nousee ladattaessa. Kennoa ladattaessa suojauspiirien tulee keskeyttää lataus kennon saavuttaessa käytetylle kemialle ominaisen maksimijännitteen. Esimerkiksi LFP-kennon tyypillinen katkaisujännite on 3,6 V. Ylijännitteestä saattaa seurata kennon vaurioituminen tai tulipalo. Lisäksi kennon elinikää lyhentää lataus liian suurella virralla tai väärässä lämpötilassa. [18]



Kuva 27. Tyypillinen litiumioniakun jännitteen käyttäytyminen purku- ja lataustilanteessa. Napajännite tarkoittaa kuormitetun kennon navoista mitattua jännitettä ja katkaisujännite on valmistajan ilmoittama jännite jonka alle akkukennon jännite ei saa pudota tai kenno saattaa vahingoittua pysyvästi.

Kennon elinikää lyhentävät purku väärässä lämpötilassa ja liian suuri purkuvirta. Myös muutamaa sekuntia pidemmät suuret virtapulssit saattavat vahingoittaa kennoa pysyvästi. Kennon varaustilan laskiessa suojauselektronikan on huolehdittava, ettei kennon jännite tipu liian alas tai kenno vahingoittuu pysyvästi. Katkaisujännite vaihtelee valmistajakohtaisesti riippumatta akkukemiasta. Esimerkiksi erään valmistajan LFP-sylinterikennon voi purkaa 0 V sen vahingoittumatta, kun taas toisen valmistajan samankaltaisen LFP-sylinterikennon voi purkaa 1,8 V sen vahingoittumatta. [18]

5.2 Litiumioniakun simulointimallit

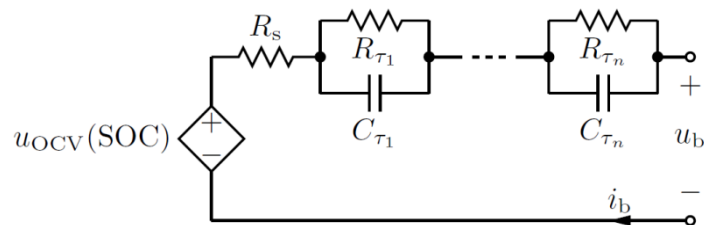
Erilaisia akun simulointimalleja on kehitetty useita ja ne lähestyvät akkujen mallintamista erilaisilla menetelmillä. Sähkökemialliset mallit pyrkivät mallintamaan akun käyttäytymistä ratkaisemalla akun sisällä tapahtuvaan kemialliseen prosessiin liittyviä aikariippuvaisia osittaisdifferentiaaliyhtälöitä. Kyseinen menetelmä on laskennallisesti vaativa ja tarvitsee hankalasti määritettäviä parametreja mallinnettavasta akusta. Se sopiikin parhaiten akkuvalmistajien käyttöön.

Toinen vaihtoehto ovat matemaattiset mallit, jotka hyödyntävät tilastollisia menetelmiä ja kokeellisia yhtälöitä. Nämä soveltuvat käyttöajan, hyötysuhteen ja kapasiteetin mallintamiseen, mutta eivät varsinaisesti sisällä tietoa akun sähköisistä ominaisuuksista. Toisena ongelmana matemaattisissa malleissa on niiden suuri (5–20 %) epätarkkuus. [23]

Parhaiten piirisimulointiin ja systeemisuunnitteluun soveltuvat akun sijaiskytkentään perustuvat sähköiset mallit. Ne koostuvat yksinkertaisimmillaan kuormittamattoman lähdejännitteen ja sarjaresistanssin yhdistelmästä. Kyseinen malli ei kuitenkaan huomioi akun lukuisia epälineaarisuuksia ja siksi monimutkaisempia ohjatuista jännitelähteistä, vastauksista, kondensaattoreista ja keloista koostuvia sijaiskytkentöjä on kehitetty. [18] [24]

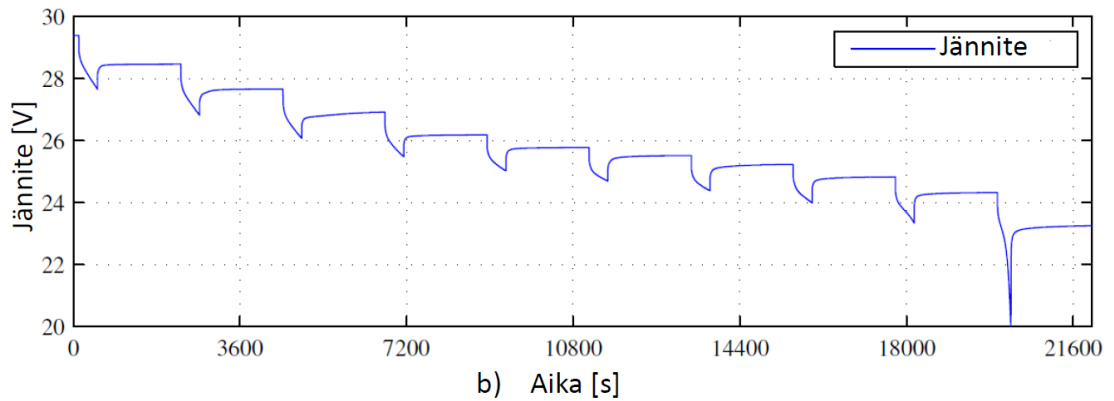
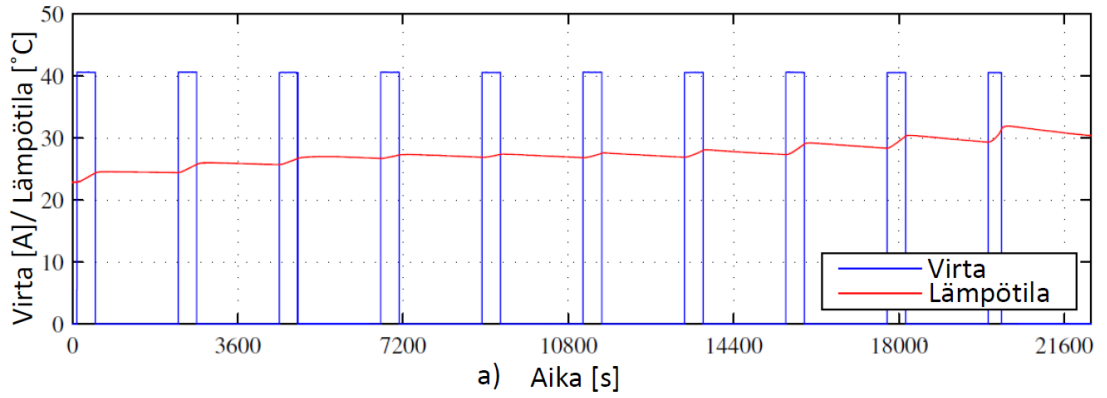
Akkukemiat ja -valmistajien ratkaisut eroavat toisistaan. Nämä voivat vaikuttaa akun käyttäytymiseen merkittävästi. Akkumalleja käytettäessä on syytä muistaa, että todellisesta akusta parametrisoitu malli on käyttökelpoinen vain tälle akkutyypille ja valmistajalle.

Kuvassa 28 on esitetty yleisesti käytetty muokattu Thevenin-sijaiskytkentä. Se koostuu jännitelähteestä $u_{OCV}(SOC)$, joka esittää avoimenpiirin jännitteen akun varaustilan funktiona, akun sarjaresistanssista R_s ja tarvittavasta määrästä mallinnettavan akun transienttikäyttäytymistä kuvaavia $R_\tau C_\tau$ -piirejä. Sarjaresistanssi R_s sisältää esimerkiksi kaapeleista, kiinnityksistä ja metallielektrodeista aiheutuvan resistanssin. Sijaiskytkennän $R_\tau C_\tau$ -piirit pyrkivät mallintamaan akun eri aikavakion omaavia sähkökemiallisia ominaisuuksia esimerkiksi elektrolyytin johtavuutta ja ionien liikkuvuutta. Malli on mahdollista rakentaa niin, että edellä mainitut parametrit voivat muuttua varaustilan, lämpötilan, virran suuruuden, virran suunnan, akun iän ja latauspurkussykliä määrän funktiona. [24]



Kuva 28. Thevenin-akkumallista muokattu kytkentä [24]

Kuvassa 28 esitetyn mallin parametrisointi voidaan suorittaa esimerkiksi käyttämällä kuvassa 29 a) esitettyä purkaussykliä. Siinä akusta otetaan lyhyitä virtapulsseja, jolloin akusta mitattu napajännite käyttäytyy kuvan 29 b) käyrän mukaisesti. Kuten kuvasta 29 a) nähdään, akun lämpötila on pyritty pitämään vakiona.



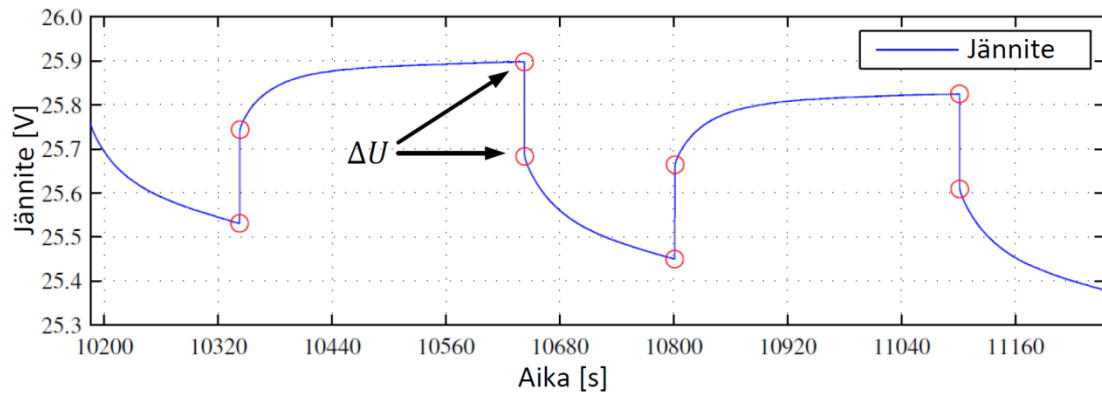
Kuva 29. Akkumallin parametrien identifiointiin käytetty purkusykli ja akun navoista mitattu napajännite [24]

Sarjaresistanssi voidaan määrittää käyttämällä yhtälöä

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (14)$$

jossa R_s on akun sarjaresistanssi
 ΔU on jännitteen muutos
 ΔI on virran muutos

Kuvassa 30 on esitetty kaksi kuvan 29 b) mukaista virtapulssin aiheuttamaa jännitteen pudotusta. Sijoittamalla yhtälöön (14) virtapulssin muutoksen ΔI ja kuvaan 30 punaisilla ympyröillä merkatun jännitteen muutoksen ΔU , sarjaresistanssi R_s voidaan määrittää. [24]



Kuva 30. Akun navoista mitattu napajännite muutaman virtapulssin aikana ja sarjaresistanssin määrittämisessä käytetyn jännitteen muutoksen punaiset datapisteet (mukailtu lähteestä [24])

$R_T C_T$ -piiriparametrien määrittäminen voidaan suorittaa hyödyntämällä samanlaista purku- ja lataussykliä kuin kuvassa 29. Parametrien identifiointiin käytetään virtapulssin jälkeen tulevaa jännitteen nousevaa reunaa, koska silloin avoimen piirin jännite OCV pysyy vakiona. [24]

Akkumallit parametrisoidaan yleensä valmistajan ilmoittamalle käyttöalueelle, joten niiden hyödyntäminen oikosulkusimuloinneissa ei välttämättä anna realistista kuvaa akun käyttäytymisestä vikatilanteessa. Esimerkiksi akun sarjaresistanssin määrittämiseksi aiemmin kuvatulla menetelmällä, jännitteestä riittää satojen millisekuntien luokkaa oleva näytteenottotaajuus [24]. Oikosulkutilanteet saattavat sisältää tätä nopeampia jännitteen ja virran muutoksia.

Sarjaresistanssia pienentävät lisäksi akusta otetun virran ja akun lämpötilan kasvu [24]. Jäähdytyksen tehokkuudesta riippuen oikosulkutilanteessa akun lämpötila todennäköisesti kasvaa nopeasti eri puolilla akkua. Erilaisten akkukennojen oikosulkutesteissä tyypilliseksi lämpötilan nousuksi mitattiin 100 °C muutaman sekunnin aikana [25]. Virran suuruuden vaikutus sarjaresistanssiin on mallinnettu sekä verifioitu vain pienillä virroilla ja akun sallitulla käyttöalueella. Kirjallisuudesta ei löydy tutkimuksia akkumallien hyödyntämisestä oikosulkusimuloinneissa.

5.3 Litiumioniakun suojausvaatimukset

Eri standardointielimet ja turvallisuusorganisaatiot ovat kehittäneet turvallisuusstandardeja ja -testejä litiumioniakkujen riskien kartoittamiseen ja minimointiin. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto UL (Underwriters Laboratories), SAE (Society of Automotive Engineers) ja BATSO (Battery Safety Organisation) käyttämistä testeistä ja standardeista ajoneuvokäyttöön tarkoitetuille akuille ja

energianvarastointijärjestelmille. Taulukossa 2 on selitetty tarkemmin standardin sovelluskohdetta. Kuten taulukosta 1 nähdään, kaikkien organisaatioiden testit pyrkivät selvittämään vähintään akkujen kestävyys- ja sähköisissä, mekaanisissa ja ympäristöolosuhteista johtuvissa vikatilanteissa. Koska litiumioniakkuteknikka on yleistynyt ajoneuvoissa vasta viime vuosina, niiden testaus ja yleiset turvallisuusstandardit eivät ole vielä täysin loppuun asti kehiteltyjä ja määriteltyjä. Esimerkiksi akun sisäinen oikosulku kuuluu vasta muutaman organisaation vaatimukseen. [26] [25]

Taulukko 1: Standardointielimien ja luokituslaitosten testausstandardit litiumioniakuille [26]

Testikriteeri/ Standardi	UL 1642	UL Subject 2271	UL Subject 2580	J2464	BATSO 01
Ulkoinen oikosulku	•	•	•	•	•
Epänormaali lataus	•	•	•	•	•
Pakotettu purku	•	•	•	•	
Rusentuminen	•	•	•	•	•
Törmäys	•	•	•		
Isku	•	•	•	•	•
Tärinä	•	•	•	•	•
Lämmitys	•	•	•	•	
Lämpösyklus	•	•	•	•	•
Matala ilmanpaine	•	•	•		•
Projektiili	•	•	•		
Pudotus		•	•		•
Jatkuva lataus					
Kotelon lämmitys					
Avoimen piirin jännite					
Eristysvastus			•		
Väärinpäin lataus		•	•		
Lävistys		•	•	•	
Sisäinen oikosulku	•		•		

Taulukko 2: Standardointielimien ja luokituslaitosten testausstandardit litiumioniakuille [26]

Underwriters Laboratories	
Standardi	Selitys
UL 1642	Litiumakut
UL Subject 2271	Akut, joita käytetään kevyissä sähköajoneuvosovelluksissa
UL Subject 2580	Akut, joita käytetään sähköajoneuvoissa
Society of Automotive Engineers	
Standardi	Selitys
J2464	Sähkö- ja hybridisähköajoneuvojen energianvarastointijärjestelmät
J2929	Sähkö- ja hybridiajoneuvojen akkujärjestelmän turvallisuusstandardi. Litiumiin perustuvat kennotyypit.
Battery Safety Organisation	
Standardi	Selitys
BATSO 01 (ehdotus)	Ohjeistus, Akut joita käytetään kevyissä sähköajoneuvosovelluksissa

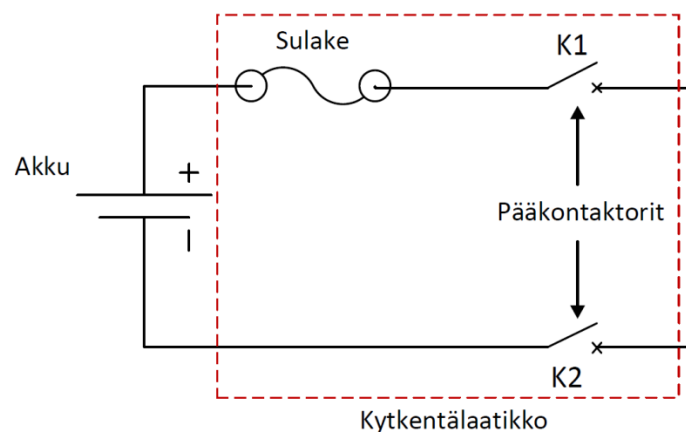
Usean taulukossa 1 esiintyvän testin läpäisyyn vain akkupaketin valmistaja voi vaikuttaa. Siksi tässä diplomityössä keskitytäänkin tutkimaan akkupaketin ulkoisia oikosulkuja ja keinoja niiden vahinkojen minimointiin. Diplomityön kannalta mielenkiintoisin testi on akun ulkoinen oikosulku. Se suoritetaan kytkemällä matalaimpedanssinen kaapeli akun positiivisen ja negatiivisen navan välille. Testin tarkoituksena on määrittää kestäkö akku testissä esiintyvän virran syttymättä tuleen tai räjähtämättä. Testi vastaa suoraan kuvan 4 a) tilannetta, mutta jättää ottamatta huomioon muut mahdolliset oikosulkutilanteet. Muiden testien tarkempi kuvaus on esitetty lähteessä [26].

Kirjallisuuden perusteella kennotason vertailevia oikosulkutestejä on suoritettu jonkin verran esimerkiksi lähteissä [25] [27]. Akkukennon ja -moduulin oikosulkutilanteet eroavat kuitenkin merkittävästi toisistaan, koska kennojen kytkeminen sarjaan

kasvattaa niiden sarjaresistanssia. Tämä tekee jäykän oikosulun tapauksessa testipiirin oikosulkuimpedanssista merkityksettömän pienen. [25]

5.4 Litiumioniakun tyypilliset suojaustavat ja niiden mitoitus

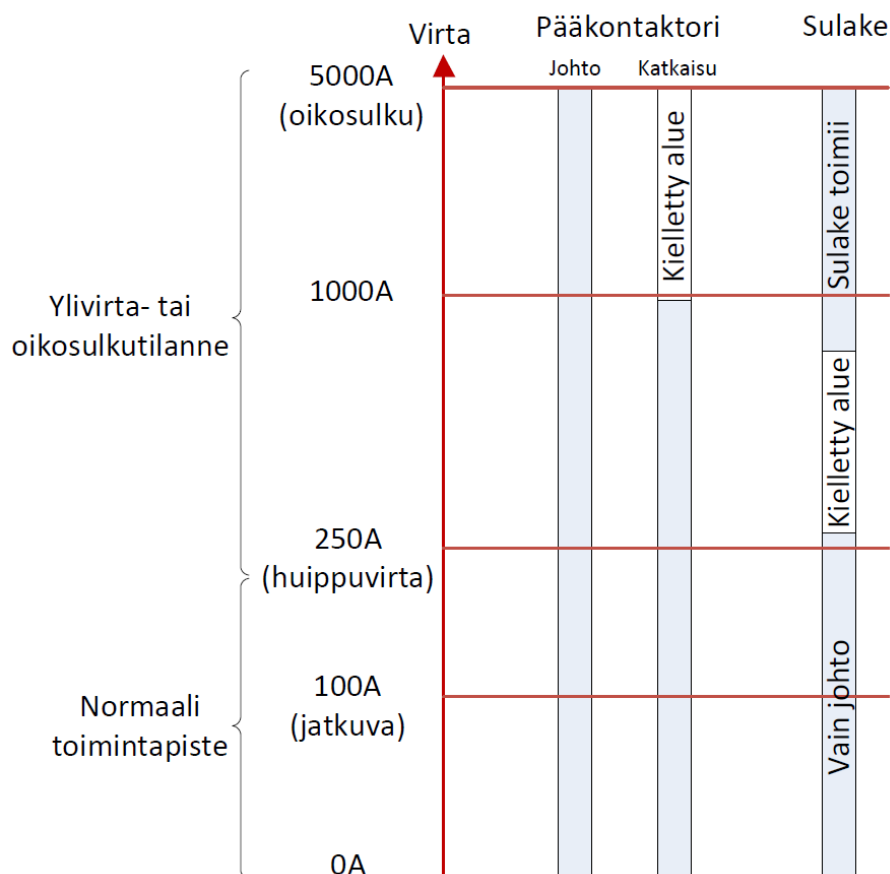
Kuvassa 31 on esitetty ajoneuvoissa akkujen suojaukseen tyypillisesti käytetyn suojausmoduulin rakenne. Se koostuu pääsulakkeesta ja akustonhallintajärjestelmän ohjaamista ajoneuvokäyttöön tarkoitetuista DC-kontaktoreista. Sulakkeen tehtävänä on katkaista oikosulkuvirta ja DC-kontaktorit toimivat akustonhallintajärjestelmän ohjaamina häiriötilanteissa suojaten akkua vahingoittumiselta.



Kuva 31. Tyypillinen akun suojausmoduulin rakenne [18]

Koska ajoneuvokäytössä akun jännite- ja virtataso muokataan muulle piirille sopivaksi tehoelektroniikan avulla, ylikuormituksesta johtuvat häiriötilanteet voidaan pääsääntöisesti hoitaa käskemällä esimerkiksi tasasähkökatkojaa tai moottoria ohjaavaa taajuusmuuttajaa pienentämään akusta otettua virtaa. Akustonhallintajärjestelmä pyrkii avaamaan ja sulkemaan pääkontaktoreita virrattomana kärkeen tarpeettoman kulumisen ehkäisemiseksi. Pääkontaktorien avaamiseen virrallisena johtavat syyt, esimerkiksi ylivirta tai yllämpö, riippuvat käytettävästä akustonhallintajärjestelmästä ja sovelluskohtaisista parametreista. Yleistä standardia kontaktorien avaamiskriteereistä ei ole saatavilla ja akustonhallintajärjestelmään rakennetut suojausfunktiot ovat valmistajakohtaisia. Koska akun virta-anturia ei käytetä varsinaisesti puolisisiltakatkajan säätöön vaan akun varaustilan arviointiin ja ylivirtatilanteiden havaitsemiseen, käytetään virta-anturina suhteellisen hidasta esimerkiksi näytteenottotaajuudeltaan 10 ms–100 ms mittaava virta-anturia. [18]

Kuvassa 32 on havainnollistettu pääkontaktorin ja aR-tyyppisen sulakkeen yhteistoimintaa eri ylivirta- ja oikosulkutilanteissa. Kuten kuvasta nähdään, kontaktorin tulee kestää suurin piirissä esiintyvä virta vikatilanteessa sen tuhoutumatta ylikuumenemista. Kontaktorin ja sulakkeen katkaisupalkeissa esiintyvät kielletyt alueet kuvaavat virta-alueita, joilla suojalaitteet eivät toimi oikein ja voivat mahdollisesti tuhoutua. [28]



Kuva 32. Pääkontaktorin ja sulakkeen yhteistoiminta eri tilanteissa [28]

Käytännössä on vaikea varmistua siitä, että ei toimita kuvan 32 osoittamalla kahdella kielletyllä alueella. Kuten edellisissä kappaleissa on esitetty, akkujen käyttäytyminen on aina valmistajakohtaista. Vaikka akkuvalmistaja tunnettaisiin, akun oikosulkukäyttäytymisestä ja toiminnasta ulkoisen piirin kanssa on saatavilla kirjallisuustutkimuksen sekä haastatteluiden perusteella vähän tietoa. Esimerkiksi IEEE:n akkujensuojausohjeistus suosittelee seuraavia seikkoja selvitettäväksi lähdetessä suunnittelemaan toimivaa oikosulkusuojausta [11]:

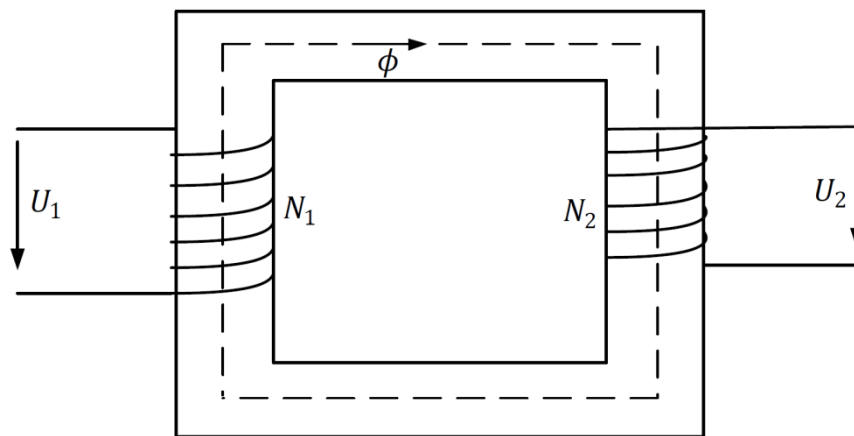
- Akun sähkökemiallinen vaste
- Akun sisäinen ja ulkoinen resistanssi
- Akun ja piirin induktanssi
- Akun kapasiteetti ja varaustila

6 Oikosulkusuojauksen vaihtoehtoinen menetelmä

Koska toimivan oikosulkusuojauksen mitoittaminen erilaisista osakokonaisuuksista koostuvaan hybridisähköjärjestelmään on haastavaa, diplomityössä tutkittiin myös vaihtoehtoisia tapoja käynnistää sulakkeen valokaariaika [29]. Kohdassa 6.1 tutustutaan ideaalimuuntajaan ja sen toimintaan. Kohdassa 6.2 esitellään sulakkeenpolttopiirin toiminta ja kohdassa 6.3 tutustutaan mittausjärjestelyihin. Lopuksi kohdassa 6.4 esitellään mittaustulokset ja johtopäätökset.

6.1 Ideaalimuuntaja

Muuntaja on sähkömagneettinen komponentti, joka mahdollistaa eri virta- ja jännitetasojen muuttamisen hyvällä hyötysuhteella. Sen toiminta perustuu Faradayn induktiolakiin, eli muuttuvan magneettivuon indusoimaan sähkömotoriseen voimaan. Kuvassa 33 on esitetty kaksikämmisen ideaalimuuntajan periaatekuva. Se koostuu suuren permeabiliteetin omaavan sydämen ympärille kiedotuista käämityksistä, joita kutsutaan ensiö- ja toisiokäämeiksi. Ideaalimuuntajan erona todelliseen muuntajaan on se, että siinä häviöt, hajavuo ja sydämen vaatima magnetointivirta oletetaan nolliksi. Sulakkeenpolttopiirin toiminnan kannalta ideaalimuuntajan tarkastelu on riittävä.



Kuva 33. Ideaalimuuntaja

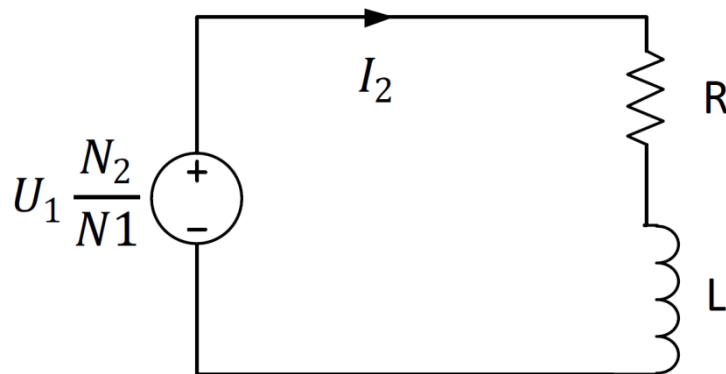
Kun jännite kytketään ensiökäämiin, sydämessä alkaa kiertää muuttuva magneettivuon ϕ . Se kulkee sydämen ohjaamana toisiokäämityksen läpi, jolloin myös toisiokäämiin indusoituu jännite Faradayn induktiolain mukaisesti.

Ideaalimuuntajan käämien kierrosluvuille ja jännitteille voidaan kirjoittaa yhtälö [30]

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (15)$$

jossa U_1 on ensiökäämin jännite
 U_2 on toisiokäämin jännite
 N_1 on ensiökäämin kierrosluku
 N_2 on toisiokäämin kierrosluku

Yhtälöstä (15) nähdään, että toisiokäämiin indusoitunut jännite riippuu ensiöjännitteestä ja kierroslukujen suhteesta. Tämän perusteella toisiolle voidaan johtaa kuvassa 34 esitetty vastinpiiri, kun siihen on lisäksi kytketty kuormaksi vastus ja induktanssi. Kuvasta nähdään, että toision virtapiiri koostuu ohjatusta jännitelähteestä ja toisiopiirissä kulkevan virran I_2 määrää siihen kytketty kuorma.



Kuva 34. Toision sijaiskytkentä RL-kuormalla

Ideaalimuuntajan ensiö- ja toisiovirralle voidaan kirjoittaa yhtälö [30]

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

jossa I_1 on ensiökäämin virta
 I_2 on toisiokäämin virta
 N_1 on ensiökäämin kierrosluku
 N_2 on toisiokäämin kierrosluku

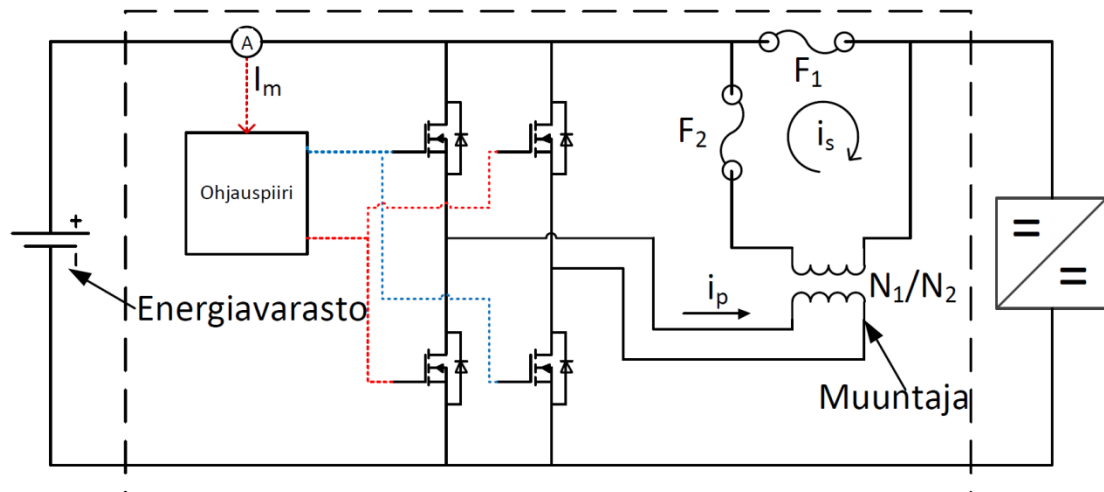
Yhtälöstä (15) voidaan päätellä, että ensiökäämin kierrosluvun ollessa suurempi kuin toision kierrosluku, toisiokäämiin indusoituu pienempi jännite kuin ensiökäämiin kytketty jännite on. Yhtälöstä (16) nähdään että, muuntajan ensiössä kulkeva virta on

pienempi kuin muuntajan toisiossa kulkeva virta. Yhtälöt (15) ja (16) ovat jännitteen ja virran aaltomuodosta riippumattomia.

6.2 Sulakkeenpolttopiiri

Kuvassa 35 on esitetty sulakkeenpolttopiirin periaatekuva. Se koostuu työkonen hybridisähköjärjestelmään kuuluvien energiavaraston ja tasasähkökatkojan lisäksi, kokosiltahakkurista, muuntajasta ja kahdesta sulakkeesta. Normaalikäytössä virta jakautuu kulkemaan sulakkeiden ja muuntajan toisiossa läpi.

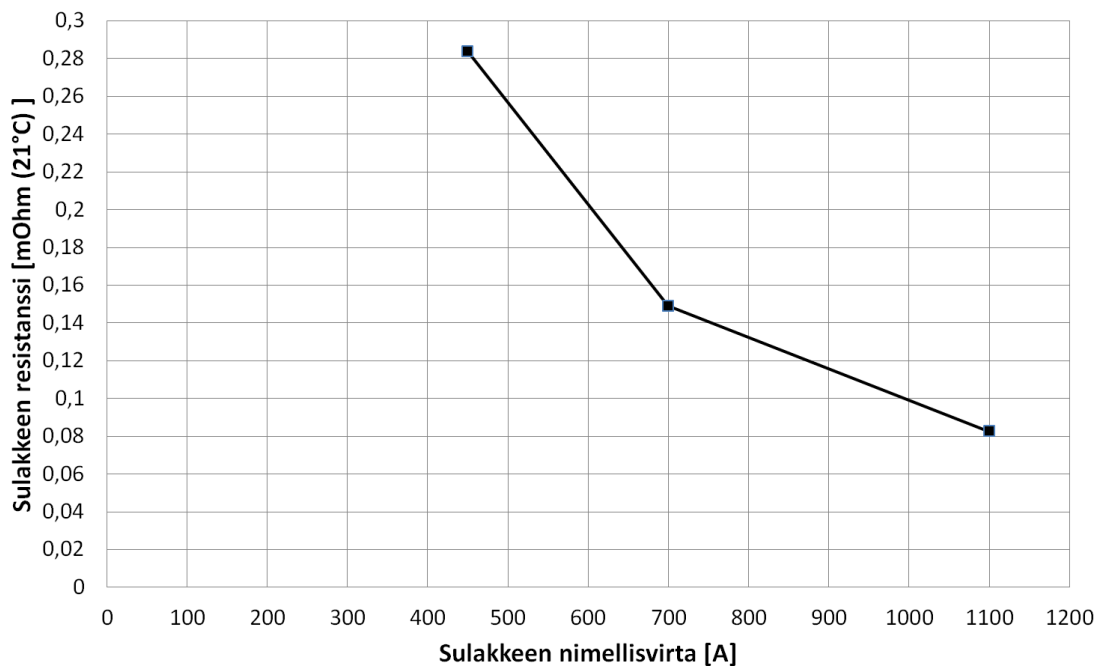
Tietyn virta-arvon ylittyessä, kokosiltahakkurin ohjauspiiri saa signaalin virta-anturilta. Tämän jälkeen ohjauspiiri kytkee kokosiltahakkurin puolijohdekytkimiä bipolaarisesti, eli muuntajan ensiossa näkyy 50/50 pulssisuhteen kanttiaalto.



Kuva 35. Suojattava piiri ja sulakkeenpolttopiiri

Muuntajan kierroslukujen suhde valitaan siten, että $N_1 \gg N_2$. Kohdassa 6.1 esitetyn teorian perusteella tämä johtaa siihen, että toisioon indusoituu ensiötä huomattavasti pienempi jännite. Toisiopiirin resistanssin ja induktanssin ollessa pieniä, jo esimerkiksi 10 V toisiojännitteellä voidaan saada aikaan suuri virta sulakkeiden F_1 ja F_2 läpi. Samanaikaisesti energiavarastosta otettu virta jää kohdan 6.1 teorian perusteella huomattavasti pienemmäksi.

Kuvassa 36 on esitetty Bussmannin valmistaman 170M65** - tyyppisen sulakkeen resistanssi sulakkeen nimellisvirran funktiona. Kuten kuvasta nähdään, sulakkeen resistanssi on pieni ja se pienenee sulakkeen nimellisvirran kasvaessa. Toisiopiirin resistanssin pienentyessä myös piirin huippuvirta kasvaa. Eli suuremman sulakkeen polttaminen helpottuu.

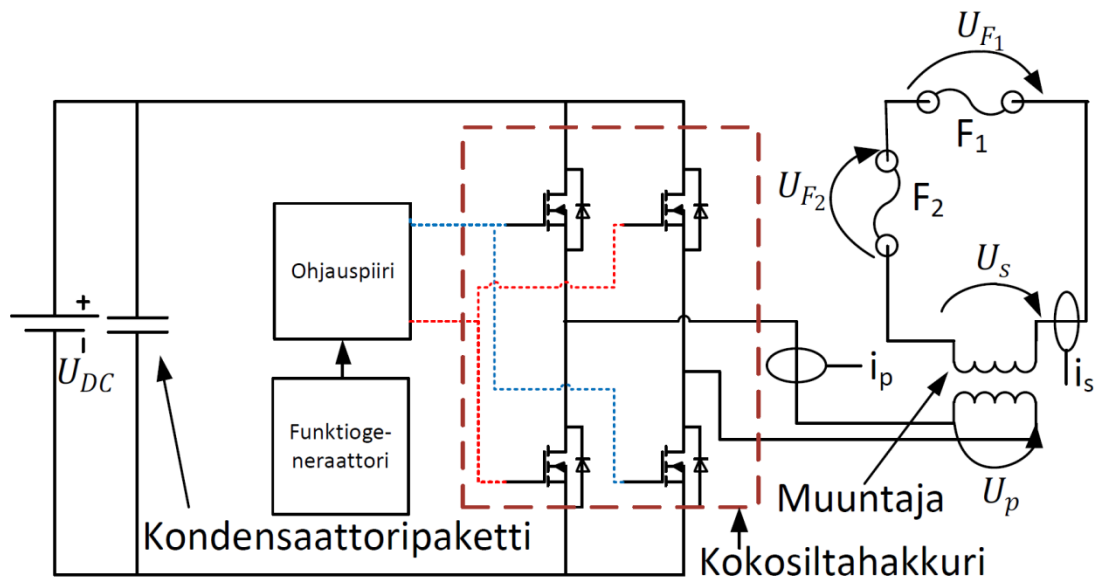


Kuva 36. Bussmannin valmistaman 170M65** - tyyppisen sulakkeen resistanssi sulakkeen nimellisvirran funktiona

6.3 Mittausjärjestely

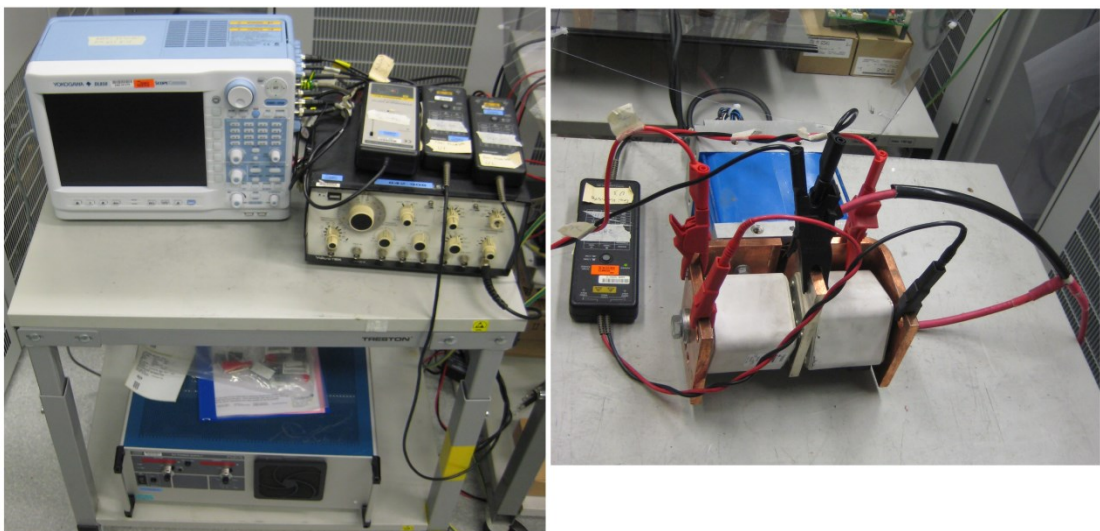
Diplomityössä sulakkeenpolttopiirin testijärjestelyn ulkopuolelle rajattiin yhteistoiminta muun hybridiajoneuvojärjestelmän kanssa. Mittauksien tarkoituksena oli tutkia kokosiltahakkurin ja muuntajan muodostaman piirin kykyä tuottaa riittävän suuri virta kahden sarjaankytketyn sulakkeen polttamiseksi.

Kuvassa 37 on esitetty sulakkeenpolttopiirin testijärjestelmä ja siitä mitatut jännitteet ja virrat. Mittauksia varten testipöydälle rakennettiin kokosiltahakkuri, johon kuului myös kondensaattoripaketti. Kokosiltahakkurin tehpuolijohdekytkimiä ohjattiin ABB:n valmistamalla hilaohjaimella bipolaarisella PWM-ohjausmenetelmällä. Pulssisuhteena käytettiin 50/50 ja tehpuolijohteiden moduloinnin aloitus- ja lopetuskäskyt annettiin hilaohjaimelle funktiogeneraattorilla. Suoritetuissa mittauksissa kokosiltahakkurin kytkentätaajuutena käytettiin 940 Hz ja välipiirinjännite oli 500 V.



Kuva 37. Testijärjestelmä ja siihen kytketyt mittaukset

Kuvassa 38 ja taulukossa 3 on esitetty käytetyt mittalaitteet, niiden maksimijännitteet ja virrat sekä mitä suuretta kukin mittalaite mittasi. Koska toisiojännitteen U_s tiedettiin olevan pieni, asetettiin Tektronixin differentiaalisen mittapään vaimennus muita mittapäitä pienemmäksi. Sen lisäksi mittalaite asetettiin lähelle muuntajaa häiriöiden välttämiseksi.

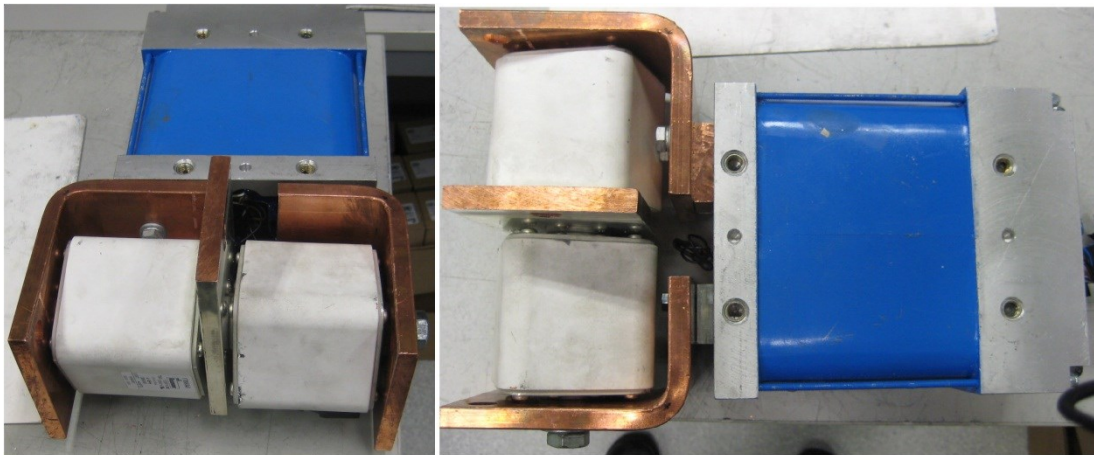


Kuva 38. Testissä käytetty mittauslaitteisto

Taulukko 3: Testissä käytetyt mittalaitteet

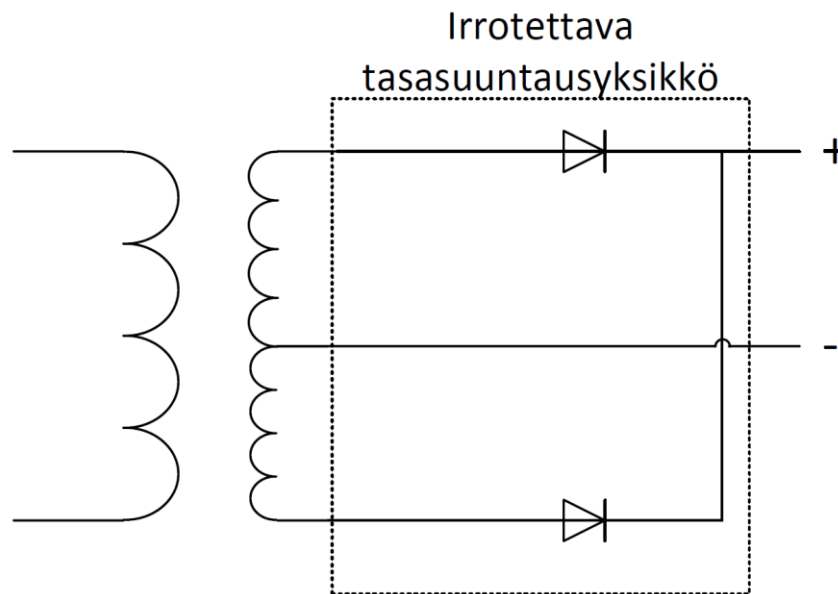
Laite	Valmistaja	Tyyppi	Mitattu suure
Oskilloskooppi , 1 GHz	Yokogawa	DL850	U_p, F_1 F_2 U_s I_p I_s
Differentiaalinen mittapää, 1300 V	Tektronix	P5200	
Differentiaalinen mittapää, 1400 V	Yokogawa	700924	
Differentiaalinen mittapää, 130 V	Tektronix	P5200	
Virta-anturi, 600A	PEM	CWT 3LFR	
Virta-anturi, 60 kA	PEM	CWT 300	
Signaaligeneraattori	Wavetek	145	
Jännitelähde, 3 A /500 V	Fug	MCA 1500	
Ohjauspiiri	ABB		

Muuntajaksi valittiin kuvassa 39 esitetty Isomaticin valmistama keskitaajuudella toimiva MIT-630 H-500/6.3 – tyyppinen hitsausmuuntaja. Keskitaajuinen hitsausmuuntaja on suunniteltu syötettäväksi kokosiltahakkurilla, jonka lähtötaajuus on noin 1 kHz. Korkean syöttötaajuuden käyttö mahdollistaa muuntajan pienen koon ja hitsausprosessin tarkan ohjauksen.



Kuva 39. Mittauksissa käytetty Isomaticin valmistama MIT-630 H-500/6.3 – tyyppinen hitsausmuuntaja

Kuvassa 40 on esitetty mittauksissa käytetyn muuntajan piirikaavio. Kuten kuvasta nähdään, muuntajan toisiokäämi on varustettu väliulosotolla, johon on liitetty irrotettava tasasuuntausyksikkö. Mittauksia varten tasasuuntausyksikkö korvattiin toisiokäämin päihin liitetyillä kiskoilla. Tasasuuntausyksikön poistamisella päästään eroon diodeissa tapahtuvasta ylimääräisestä jännitehäviöstä.



Kuva 40. Hitsausmuuntajan piirikaavio

Taulukossa 4 on esitetty hitsausmuuntajan kilpiarvot. Taulukosta nähdään, että muuntaja pystyy käsittelemään hyvin suuria hetkellisiä virtoja sen lämpenemättä tai kyllästymättä. Taulukon muuntosuhde on ilmoitettu muuntajan keskiottoa käyttämällä. Ilman keskiottoa toision käämit ovat sarjassa ja muuntosuhde puolittuu arvoon 35/1. Muuntosuhteen puolittuessa toision lähtöjännite kaksinkertaistuu.

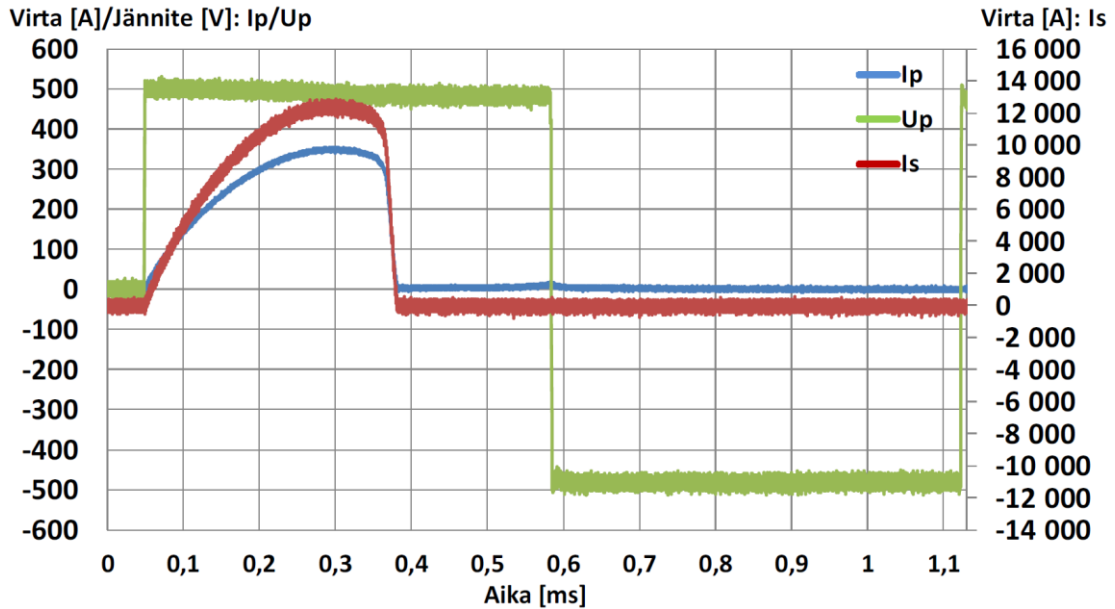
Taulukko 4: Hitsausmuuntajan tiedot

Valmistaja	Isomatic
Tyyppi	MIT-630 H-500/6.3
Ensiöjännite, U_{1N}	500 V
Jatkuva ensiövirta, I_{1p}	78 A
Syöttötaajuus, f_N	1000 Hz
Tasasuunnattu toisiojännite, U_{2N}	6,3 V
Toision hetkellinen maksimivirta, I_{FSM} (diodien kestäjän 10 ms virtapulssin huippuarvo)	50 kA
Muuntosuhde, N_1/N_2	70/1

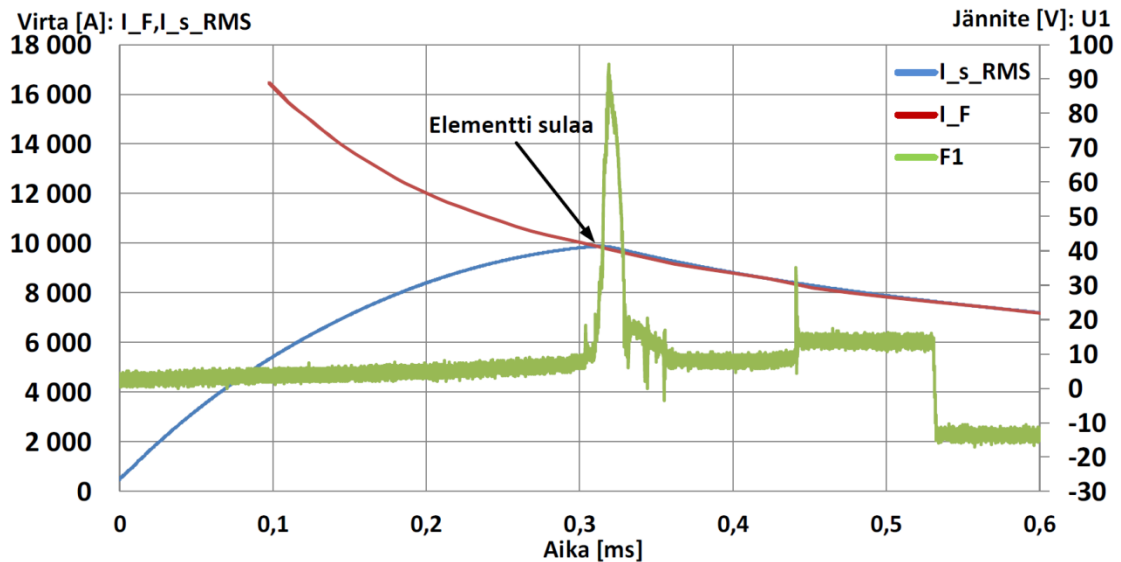
6.4 Mittaustulokset ja niiden tarkastelu

Kuvissa 41, 42 ja 43 on esitetty mittaustulokset erästä testijärjestelmällä suoritetusta mittauksesta. Kyseisessä mittauksessa käytettiin kahta sarjaankytkettyä Bussmannin valmistamaa 170M6541 -tyyppistä 450 A sulaketta. Kuvista 41 ja 42 nähdään, että sulake-elementti sulaa ensimmäisen pulssin aikana. Sulamisaika on noin 0,31 ms. Kuvista nähdään myös, että valokaariaika on lyhyt koska piirin induktanssi ja muuntajan toisiojännite ovat pieniä ja valokaarijännite kasvaa toisiojännitettä

huomattavasti suuremmaksi. Kuvasta 41 nähdään, että toision huippuvirta on noin 13 kA ja ensiön noin 350 A. Kuvaan 42 on piirretty toisiovirrasta I_s liukuva tehollisarvo I_{sRMS} , joka on laskettu yhtälöllä (4). Kuvaan on lisäksi piirretty valmistajan sulakkeelle tarjoama sulamiskäyrä I_F . Kuten kuvasta nähdään, sulamiskäyrän ja liukuvan tehollisarvon leikkauskohdassa elementti sulaa ja valokaaret syttyvät, jolloin sulakkeen yli mitattu jännite F_1 kasvaa nopeasti.



Kuva 41. Ensiöjännitteen U_p , ensiövirran I_p ja toisiovirran I_s mitatut käyrämuodot

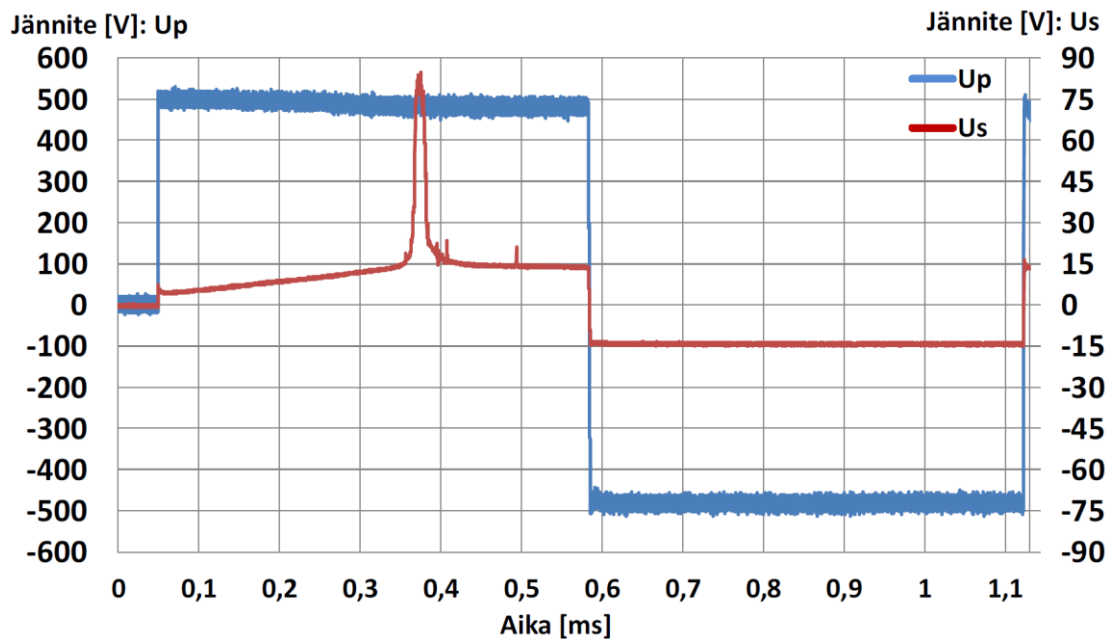


Kuva 42. Sulakkeen yli olevan jännitteen F_1 mitattu käyrämuoto ja toisiovirran liukuvan tehollisarvon I_{sRMS} laskettu käyrämuoto. Lisäksi Bussmannin valmistaman 170M6541 -tyyppisen 450 A sulakkeen sulamiskäyrä I_F .

Kuvassa 43 on esitetty mitattu ensiöjännite U_p ja toisiojännite U_s . Laskettu jännitteen aikakeskiarvo aikaväliltä 0,58ms–1,12ms on 14,25 V. Yhtälöstä (15) voidaan ratkaista ensiöjännite

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad (17)$$

Käyttämällä edellä esitettyä muuntosuhdetta 35/1, toisiojännitteen aikakeskiarvoa ja yhtälöä (17) saadaan ensiöjännitteeksi noin 499 V. Tulos vastaa hyvin valmistajan ilmoittamaa muuntosuhdetta.



Kuva 43. Ensiöjännitteen U_p ja toisiojännitteen U_s mitatut käyrämuodot

Taulukossa 5 on esitetty testijärjestelmällä suoritettut mittaukset. Taulukossa on esitetty käytetty sulakekoko ja tyyppi sekä sulakevalmistajan kyseiselle sulakkeelle ilmoittama resistanssi. Kuten taulukosta nähdään, sarjaankytketyistä sulakkeista jokaisessa mittauksessa on palanut vain toinen.

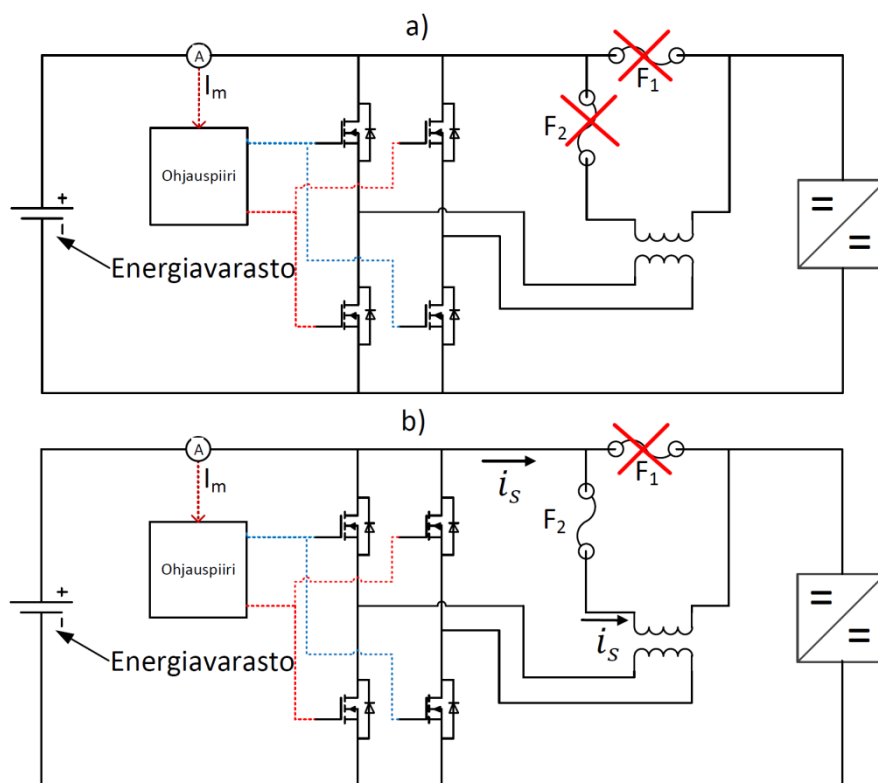
Tämä johtuu sulake-elementtien yksilöllisistä eroista, jotka näkyvät resistanssin pienenä vaihteluna. Kuten taulukosta 5 nähdään, korkeamman resistanssin omaava elementti on sulanut useimmissa mittauksissa ensimmäisenä. Koska elementissä tapahtuvat häviöt ovat suoraan verrannollisia virran neliöön ja elementin resistanssiin, korkeamman resistanssin omaava elementti lämpenee hieman nopeammin. Resistiivisempi elementti saavuttaa näin sulamispisteensä ennen toista elementtiä. Viimeiseen 450 A sulakkeella tehtyyn mittaukseen sulakkeiden resistanssien arvot pyrittiin valitsemaan mahdollisimman lähelle toisiaan. Siitä huolimatta vain toinen sulakkeista toimi.

Taulukko 5: Mittaustulokset

Sulakekoko ja tyyppi	Resistanssi	Palanut sulake
700 A 170M6545	0,1499 mΩ/21 °C	X
700 A 170M6545	0,1479 mΩ/21 °C	
700 A 170M6545	0,1594 mΩ/21 °C	X
700 A 170M6545	0,1540 mΩ/21 °C	
700 A 170M6545	0,1597 mΩ/21 °C	
700 A 170M6545	0,1595 mΩ/21 °C	X
450 A 170M6541	0,2836 mΩ/21 °C	X
450 A 170M6541	0,2835 mΩ/21 °C	

Kuvan 44 a)-kohdassa on esitetty sulakkeenpolttopiirin haluttu toiminta osana ajoneuvon sähköjärjestelmää ja b)-kohdassa mittauksien perusteella oletettu toiminta. A)-kohdassa sulakkeet katkaisevat oikosulkuvirran. B)-kohdassa vain toinen sulakkeista palaa, jolloin oikosulkuvirralla jää kulkureitti vikapisteeseen.

Diplomityössä mittauksien suorittaminen todellisessa järjestelmässä ei ollut mahdollista, mutta mittauksien perusteella suojausratkaisu ei ole toimiva. Suojattaessa todellista järjestelmää sulakkeenpolttopiirillä, sulakkeen valokaariaika on kuitenkin huomattavasti pidempi oikosulkupiirin induktanssista ja akun korkeammasta jännitteestä johtuen. Siten saattaa olla mahdollista, että myös toisen sulakkeen elementti ehtii sulaa. Sulakkeen toimintaperiaatteesta johtuen asiaa on hankala simuloida, kuten kohdasta 4.4 käy ilmi.



Kuva 44. Sulakkeenpolttopiirin toiminta: a) molemmat sulakkeet ovat palaneet ja eristäneet energiavaraston muusta piiristä b) mittauksien perusteella oletettu toiminta jossa vain toinen sulakkeista on palanut ja energiavarasto syöttää oikosulkuvirtaa vikapisteeseen.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työn tarkoituksena oli tutkia litiumioniakun ja tasasähkökatkojan muodostaman kokonaisuuden oikosulkusuojausta hybridityökoneessa. Suurten litiumioniakkujen hyödyntäminen työkoneissa on yleistynyt vasta viime vuosina. Työn kuluessa tämä ilmeni käytännönkokemuksen puutteena oikosulkutilanteista ja tutkimuksien vähäisyytenä kyseisen aihepiirin osalta.

Työn tutkimuskohteeksi oikosulkusuojusta valittiin yleisesti käytetyt suojauslaitteet: sulake ja DC-kontaktori. Sulakesuojauksen toimivuutta heikentäväksi tekijäksi osoittautui tarve sulakkeen nimellisvirran ylimitoitukseen ajoneuvokäytössä. Tämä on seurausta korkeasta ympäristölämpötilasta ja ajoprofiilin syklisyydestä. Myös sulakkeiden DC-virrankatkaisukyky on hankalasti laskettava suure ja edellyttää oikosulkupiirin tuntemista. Markkinoilta löytyvät ajoneuvokäyttöön tarkoitetut DC-kontaktorit osoittautuivat tutkimuksessa paremmin henkilöautokokoluokkaan soveltuviksi.

Suurimpana ongelmana työssä nousi kuitenkin esiin systemaattisen menetelmän puute oikosulkusuojien mitoitukseen. Haastatteluiden ja kirjallisuustutkimuksen perusteella akkujen käyttäytymisestä muussa oikosulkutilanteessa kuin akun jäykässä napaoikosulussa ei osata sanoa mitään varmaa. Tällöin sulakkeiden ja kontaktoreiden turvallisesta toiminnasta on vaikea varmistua, koska akun toimintaa ja toimivan oikosulkusuojauksen kannalta kriittisiä piiriparametreja ei tunneta tarpeeksi tarkasti. Testausstandardit eivät juuri tuo tähän apua, koska ne testaavat akkujen selviytymisen juuri jäykästä napaoikosulusta.

Koska markkinoilta ei löytynyt luotettavaa ratkaisua oikosulkusuojaukseen, tarkoitukseen suunnitellun sulakkeenpolttopiirin soveltuvuutta suojausvaihtoehdoksi päätettiin tutkia mittauksilla. Kyseinen suojausratkaisu osoittautui mittauksien perusteella toimimattomaksi, koska sarjaankytketyt sulakkeet eivät palaneet mittauksissa samanaikaisesti. Vain toisen sulakkeen palaminen todellisissa käyttöolosuhteissa jättää oikosulkuvirralla reitin vikapisteeseen.

Työlle asetettu tavoite toimivan oikosulkusuojausratkaisun löytämiseksi ei täyttnyt. Työssä saatiin kuitenkin nostettua esille nykyisten ratkaisujen ongelmakohtia ja luotua katsaus tämän hetkiseen tietämykseen aihepiiristä. Jatkotutkimuskohteeksi voidaan asettaa systemaattisen menetelmän kehittäminen oikosulkuvirtojen laskemiseksi. Parhaassa tapauksessa oikosulkuvirtojen laskemiseen voidaan käyttää oikosulkutilanteessa verifioitua akun piirisimulaattorimallia. Huonoimmassa tapauksessa on suoritettava koko hybridisähköjärjestelmän oikosulkutestit. Ajan kanssa karttuva käytännönkokemus tulee myös osoittamaan, kuinka suuri ongelma oikosulkusuojaus on hybridityökoneissa.

Viitteet

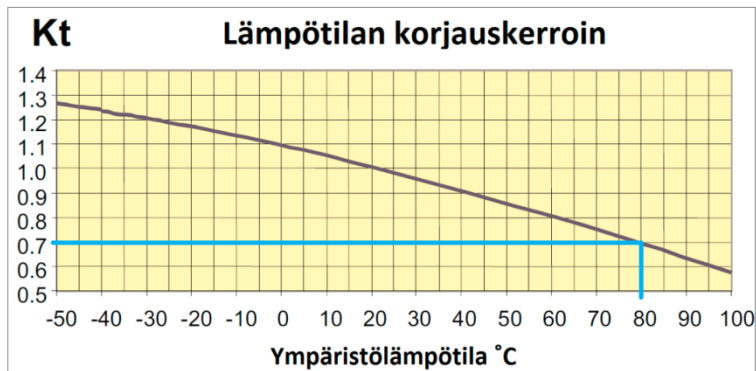
- [1] M. Kulju, *AC Drives Technical Guide Book*, Helsinki, ABB Oy Drives, 2003.
- [2] N. Mohan, T. Undeland ja W. Riobbins, *Power Electronics, Converters, Applications, and Design*, 3. painos, John Wiley & Sons, inc., USA, 2003.
- [3] S.-M. Kim ja S.-K. Sul, ”Control of Rubber Tyred Gantry Crane with Energy Storage”, *Power Electronics Specialists Conference, 2005*. Konferenssijulkaisu, 2005.
- [4] B. Arnet ja L. Haines, ”High Power DC-to-DC Converter For Supercapacitors”, *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*. Konferenssijulkaisu, Cambridge, MA , 2001.
- [5] A. Wright ja P. Newbery, *Electric Fuses*, 3. painos, London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [6] Cooper Bussmann, *Selecting Protective Devices Handbook*, valmistajan sovellusohje, 2008.
- [7] C. Mulertt, *Edupack, Introduction to protection by fuses*, Ferraz Shawmut, 2007.
- [8] J. Niiranen, *Tehoelektroniikan komponentit*,. 4. painos, Helsinki, Otatieto, 2007.
- [9] H. Cline, ”Fuse Protection of DC Systems”, *Annual Meeting of the American Power Conference*. Konferenssijulkaisu, 1995.
- [10] *Semiconductor Fuse Application Guide*, Mersen, 2002. Valmistajan sovellusohje
saatavissa: <http://ep-us.mersen.com/oem/resources/literature/Semiconductor-Fuse-Applications-Guide.pdf>. [Haettu 8.1.2013].
- [11] Battery Protection Subcommittee of SCC 29, ”IEEE Guide for the Protection of Stationary Battery Systems,” The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1998.

- [12] P. Köllensperger, S. Böhm ja M. Hilscher, "Design and Verification of a Simulation Model for Fuses with High-Breaking Capacity", *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*. Konferenssijulkaisu, San Jose, CA, 2009.
- [13] T. Tanaka ja M. Yamasaki, "Modeling of Fuses for Melting Time and Fusing Current Analysis", *Telecommunications Energy Conference, 2004. INTELEC 2004. 26th Annual International*. Konferenssijulkaisu, Rooma, 2004.
- [14] GIGAVAC, "High Voltage Relay Designs," GIGAVAC, [Online]. Valmistajan sovellusohje, saatavissa: <http://www.gigavac.com/apps/relays/relay-designs/index.htm>. [Haettu 10.4. 2013].
- [15] Omron, "Omron DC relays," Omron Corporation, 2012. saatavissa: <http://www.omron.com/ecb/products/dry/special/dcpower/>. [Haettu 19.04.2013].
- [16] TE connectivity, "Relay Book". Valmistajan sovellusohje, saatavissa: http://www.te.com/content/dam/te/global/english/products/relays/catalogs/files/powerrelaysbook/C0_v4bg_2.pdf [Haettu 15.07.2013].
- [17] Tyco Electronics, *KILOVAC EV200 Series Contactor*, Datalehti, saatavissa: <http://relays.te.com/datasheets/ev200.pdf>.
- [18] A. Davide, *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*, Norwood: Artech House, 2010.
- [19] MIT Electric Vehicle Team, "A Guide to Understanding Battery Specifications," 2008. Saatavissa http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf. [Haettu 22.01.2013].
- [20] Biomeri Oy, "Sähköajoneuvot Suomessa - Selvitys," Saatavissa: http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf. [Haettu 22.01.2013].
- [21] Kurssin "Electric Power Transmission in Vehicles and Mobile Machines" luentomateriaali, *Li-Ion Battery Technology*, Espoo: Aalto University ELEC, 2012.
- [22] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay ja A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, New York: CRC Press, 2005.

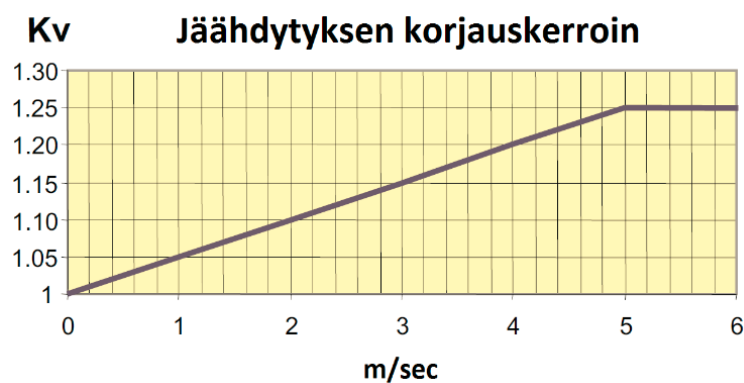
- [23] R. Kroeze C. ja K. T. Philip, "Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations", *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*. Konferenssijulkaisu, Rodos, 2008.
- [24] A. Hentunen, *Electrical Modeling of Large Lithium-Ion Batteries for Use in Dynamic Simulations of Electric Vehicle*. Lisensiaattityö, Espoo, 2012.
- [25] F. Conte, P. Gollob ja H. Lacher, "Safety in the battery design: the short circuit," *World Electric Vehicle Journal*, osa III, 2009.
- [26] Underwriters Laboratories, *Safety Issues for Lithium-Ion Batteries*, 2012.
Saataavissa:
http://www.ul.com/global/documents/newscience/whitepapers/firesafety/FS_Safety%20Issues%20for%20Lithium-Ion%20Batteries_10-12.pdf [Haettu 15.07.2013]
- [27] C. Kallfaß, C. Hoch ja A. Hilger, "Short-circuit and overcharge behaviour of some lithium ion batteries", *9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Konferenssijulkaisu, Lippstadt, 2012.
- [28] D. H. Doughty, "Lithium-Ion Cell and Battery Safety," *Advanced automotive battery conference*, 2013.
- [29] J.-P. Kittilä ja O. Niiranen, *Hybridisähköjärjestelmän oikosulkusuojaus*, Hyödyllisyysmalli, 2013.
- [30] J. Luomi ja A. Niemenmaa, *Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 1*, Espoo: Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan korkeakoulu, 2010.

Liite A: Sulakkeen nimellisvirran mitoitus syklisessä käytössä

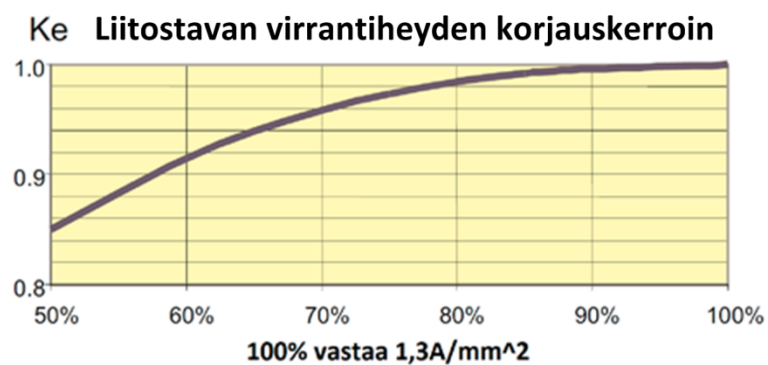
Kuvissa A1–A4 on esitetty sulakevalmistaja Bussmannin korjauskäyrästä.



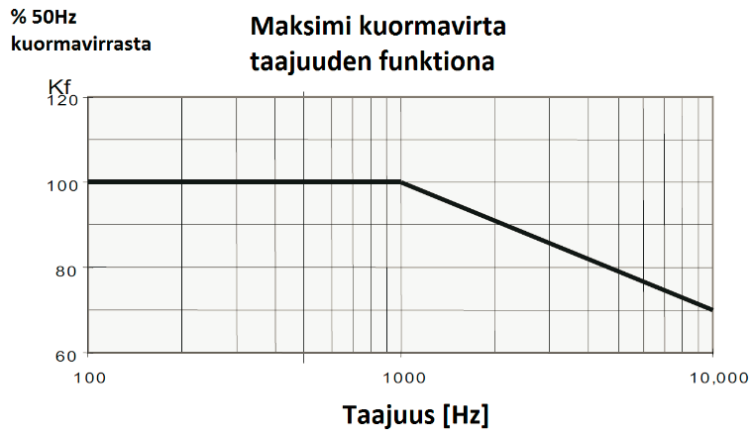
Kuva A1. Lämpötilan korjauskertoimen valinta [6]



Kuva A2. Jäähdytyksen korjauskertoimen valinta [6]



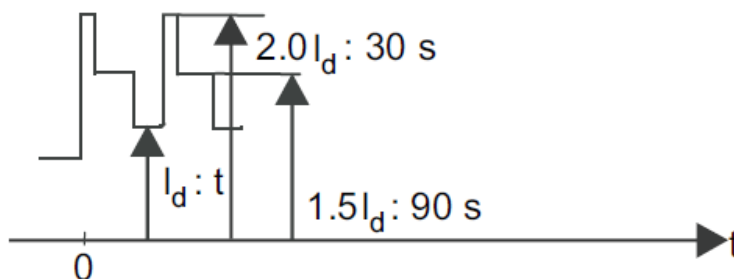
Kuva A3. Liitostavan virrantiheyden korjauskertoimen valinta [6]



Kuva A4. Taajuuden korjauskertoimen valinta [6]

Oletetaan ympäristölämpötilaksi 80 °C, jolloin kuvasta A1 lämpötilan korjauskertoimen K_t arvoksi voidaan lukea 0,7. Oletetaan lisäksi, että muut olosuhteet vastaavat testiolosuhteita ja sulake sijoitetaan laatikkoon, jolloin täytyy käyttää lisäksi korjauskerrointa 0,8.

Kuvassa A5 on esitetty Bussmannin ajoprofiili kaivoskäytölle. Taulukossa A1 on esitetty neljä erikestoista ajoprofiilia, virran suhteellisarvot ja ajoprofiilin kesto. Syklisyyskerroimen G arvoksi Bussmann ilmoittaa kyseisellä ajoprofiililla 2.



Kuva A5. Kaivoskoneen esimerkki ajoprofiili [6]

Taulukko A1: Ajoprofiilien kestoajat

	Id (p.u.)	t (min.)
0h - 2h	1.3	10
2h - 10h	0.8	15
10h - 12h	1.3	10
12h - 24h	0.7	30

Virran perusarvoksi on valittu $I_{base} = 250$ A ja siitä on taulukkoon A2 laskettu taulukkoa A1 hyväksikäyttämällä nimellisvirrat jokaiselle ajoprofiilille. Lisäksi taulukossa A2 on ilmoitettu ajoprofiilin kesto aika ja nimellisvirran I_d sekä käytön kesto aika t_d . Taulukossa A3 on ilmoitettu virtasyklien suuruudet ja niiden kestoajat.

Taulukko A2: Nimellisvirran kesto aika ja määrittäminen suhteellis arvosta

Ajoprofiili	Aikaväli	Kesto aika [s]	I_d [p.u.]	I_d [A] [$I_{base} \cdot I_d(p.u.)$]	t_d [s]
1.	0h-2h	7200	1,3	325	600
2.	2h-10h	28800	0,8	200	900
3.	10h-12h	7200	1,3	325	600
4.	12h-24h	43200	0,7	175	1800

Taulukko A3: Virtasyklien suuruudet

Ajoprofiili	$2 \cdot I_d$ [A]	t_1 [s]	$1,5 \cdot I_d$ [A]	t_2 [s]
1.	650,0	30	487,5	90
2.	400,0	30	300,0	90
3.	650,0	30	487,5	90
4.	350,0	30	262,5	90

Taulukkoon A4 on laskettu yksittäisen ajoprofiilin kesto aika ja ajosyklien lukumäärä.

Taulukko A4: Sykliin yhteenlaskettu kesto aika ja syklien lukumäärä

Ajoprofiili	Kesto [s] ($t_d + t_1 + t_2$)	ajosyklien lukumäärä (kesto aika/kesto)
1.	720	10
2.	1020	29
3.	720	10
4.	1920	23

Ajoprofiilien virran tehollisarvo voidaan määrittää yhtälöllä

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n i_k^2 \cdot t_k} \quad (A1)$$

jossa I_{RMS} on virran tehollisarvo
 i_k on syklin virta
 T on jaksonaika
 t_k on syklinkesto aika

Koko 24 h aikavälin virran tehollisarvoksi saadaan yhtälöä (A1) käyttämällä $I_{RMS} = 235,5 \text{ A}$.

$$I_n \geq \frac{I_{RMS} \cdot G}{K_t \cdot K_e \cdot K_v \cdot K_f} \quad (A2)$$

jossa I_n on valmistajan sulakkeelle ilmoittama nimellisvirran tehollisarvo
 I_{RMS} on syklisen kuorman virran tehollisarvo
 K_t on ympäristölämpötilan korjauskerroin
 K_e on liitostavan virrantiheyden korjauskerroin
 K_v on jäähtymisen korjauskerroin
 K_f on virran taajuuden korjauskerroin
 G on syklisyyskerroin

Sijoittamalla edellä esitetyt arvot kaavaan (A2) voidaan tarvittavan sulakkeen koko laskea

$$I_n \geq \frac{2 \cdot 235,5 \text{ A}}{0,7 \cdot 0,8}$$

$$I_n \geq 841 \text{ A}$$

Esimerkkitapauksessa sulakkeen nimellisvirran I_n tulee olla suurempi kuin 841 A.